

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**“ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE AMPLIFICADORES
DOPADOS DE ERBIO, SOBRE LA SEPARACIÓN SEÑAL RUIDO Y LA TASA DE
ERROR DE BIT DE UN ENLACE ÓPTICO WDM, MEDIANTE UNA HERRAMIENTA
DE SIMULACIÓN”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: DISEÑO, INTERCONEXIÓN Y GESTIÓN DE REDES DE
COMUNICACIÓN**

AUTORES:

Br. Fernando Edgardo Chávez Lezma

Br. Jonatan Antonio Rodríguez Guevara

ASESOR:

Ing. Eduardo Cerna Sánchez

TRUJILLO - PERÚ

2018

ACREDITACIONES

“ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE AMPLIFICADORES DOPADOS DE ERBIO, SOBRE LA SEPARACIÓN SEÑAL RUIDO Y LA TASA DE ERROR DE BIT DE UN ENLACE ÓPTICO WDM, MEDIANTE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN”

Elaborado Por:

Br. Fernando Edgardo. Chávez Lezma

Br. Jonatan Antonio Rodríguez Guevara

Aprobado por:

Ms. FILIBERTO M. AZABACHE FERNÁNDEZ
PRESIDENTE
CIP N° 97916

Ing. LENIN H. LLANOS LEON
SECRETARIO
CIP N° 139213

Ing. LUIS E. ALVARADO RODRIGUEZ
VOCAL
CIP N° 149200

Ms. EDUARDO E. CERNA SÁNCHEZ
ASESOR
CIP N° 80252

PRESENTACIÓN

Señores miembros del jurado:

De conformidad y en cumplimiento de los requisitos estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego y el Reglamento Interno de la Carrera Profesional de Ingeniería Electrónica para obtener el Título Profesional de Ingeniero electrónico, ponemos a vuestra disposición el presente Trabajo de Tesis titulado: **“ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE AMPLIFICADORES DOPADOS DE ERBIO, SOBRE LA SEPARACIÓN SEÑAL RUIDO Y LA TASA DE ERROR DE BIT DE UN ENLACE ÓPTICO WDM, MEDIANTE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN”**.

Este trabajo, es el resultado de la aplicación de los conocimientos adquiridos en la formación profesional en la Universidad, excusándonos anticipadamente de los posibles errores voluntarios cometidos en su desarrollo.

Trujillo, 02 de Marzo de 2018

Br. Fernando Edgardo Chávez Lezma

Br. Jonatan Antonio Rodríguez Guevara

DEDICATORIAS

A Dios, por guiar mi vida y por estar conmigo siempre en cada etapa, por bendecirme con un hijo quien es mi motivo para seguir adelante y ser mejor en la vida.

A mi padre, que está en el cielo gracias a su esfuerzo y sacrificio he conseguido en la vida muchos logros, por brindarme su apoyo incondicional siempre.

A mi madre, por sus consejos y apoyo en todo este largo camino profesional, por ser el pilar fundamental de mi familia, por estar conmigo siempre.

A mi Hermana, por su apoyo incondicional en mi proceso de formación profesional, por ser la mejor hermana y un ejemplo a seguir en la familia

A mi Asesor, el Ing. Eduardo Cerna Sánchez, por brindarnos toda su experiencia y dedicación en el proceso de realizar esta tesis.

A mi compañero de tesis y amigo Jonatan, que gracias a su apoyo y comprensión, ahora estamos culminando una etapa importante en nuestra carrera profesional

Fernando E. Chávez Lezma

DEDICATORIAS

A Dios, por regalarme la vida e iluminar cada paso que doy. Por qué sin su bendición todo lo bueno que me ha pasado, incluyendo a mi familia, no hubiera sido posible.

A mi Madre Marcela, quien es la persona más importante de mi vida. Quién no solo me llevó en su cuerpo, sino que ha dado prácticamente todas sus fuerzas por sacarnos adelante.

A mi Hermana Gina, quien ha estado en los momentos más difíciles y que ha sabido guiarme por buen camino.

A mi Padre Jorge, quién sé que está orando y deseándonos lo mejor.

A Melina, por ser esa compañera incondicional de mi vida. Y quien no escatima en demostrar en cada momento, su amor por nuestra nueva familia.

A nuestra personita más querida y muy especial, que está en camino. Nuestro amor hecho persona. Quien se ha robado desde ya, el corazón de todos. Sabemos que viene con mucha bendición y con el cuidado de Dios.

Al Señor Eriko Santisteban y a su esposa, la señora Elvira Quiñones, quienes con su bendición, apoyo y sabiduría nos han ayudado a seguir adelante.

A mi asesor el Ingeniero Eduardo Cerna, quien con su conocimiento y paciencia nos guio durante todo este proceso.

A mi compañero de tesis y amigo Fernando, quien pasó por un momento difícil en su vida, pero gracias a Dios y a su tenacidad, estamos ahora terminando una etapa importante.

Jonatan A. Rodríguez Guevara

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darnos la fortaleza para formarnos profesionalmente como hombres de bien y contribuir con nuestra sociedad y nuestro planeta.

A la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo, por brindarnos los conocimientos necesarios para el desarrollo de nuestra Tesis y mostrarnos el camino hacia el éxito.

A nuestros profesores de ingeniería electrónica, por inculcarnos valores y una buena formación académica.

A nuestros padres por enseñarnos a luchar por nuestros sueños y por darnos su apoyo incondicional en nuestras metas trazadas.

A nuestro asesor de tesis, el Ingeniero Eduardo Cerna Sánchez, por todo el apoyo brindado en el desarrollo de nuestra tesis.

Gracias a Todos

RESUMEN

El presente trabajo de investigación documenta un estudio de la influencia del número de amplificadores dopados de erbio sobre la separación señal ruido y la tasa de error de bit en un enlace óptico WDM, mediante una herramienta de simulación. Se emplearon para la simulación parámetros típicos de amplificadores EDFAs y fibra óptica. Los resultados obtenidos muestran una degradación crítica de OSNR cuando se emplea una separación de 90 km de distancia entre amplificadores independientemente del número de amplificadores usados. Asimismo se obtuvo una degradación de BER en los límites de umbral a 40 Km de distancia que se acentúa ligeramente entre el tercer y cuarto amplificador. Los resultados y conclusiones de los parámetros son presentados a través de los diagramas resultantes de simulación tales como patrón de ojo y tablas estadísticas con curvas de comparación al final del documento.

ABSTRACT

The present investigation documents a study of the influence of the number of erbium doped fiber Amplifiers on the separation signal to noise and the bit error rate in an optical link WDM, through a simulation tool. In this simulation were used typical parameters of EDFAs and fiber optic Amplifiers. The obtained results show a critical degradation of OSNR when there is a separation of 90 km between amplifiers, independent of the number of amplifiers used. Similarly a degradation of BER was obtained in the threshold limits to 40 km of distance that is slightly accentuated between the third and fourth amplifier. The results and conclusions of the parameters are presented through the resulting diagrams simulation such as eye pattern and statistical tables with comparison curves at the end of the document.

CONTENIDO

1.	CAPITULO I INTRODUCCIÓN.....	11
1.1.	Planteamiento del Problema	11
1.2.	Delimitación del problema	12
1.3.	Características y Análisis del Problema	12
1.4.	Formulación del Problema	14
1.5.	Formulación de la Hipótesis	14
1.6.	Objetivos del estudio	14
1.6.1.	Objetivo General.....	14
1.6.2.	Objetivos específicos	15
1.7.	Justificación del Estudio	15
1.7.1.	Importancia de la investigación.....	15
1.7.2.	Viabilidad de la investigación	15
1.8.	Limitaciones del estudio.....	15
1.8.1.	Limitaciones del estudio.....	15
2.	CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	16
2.1.	Antecedentes	16
2.2.	Bases Teóricas	20
2.2.1	WDM.....	20
2.2.3.	Dispersión Cromática	36
2.2.4.	Diagrama de Ojo.....	38
2.3.	Definición de términos básicos	41
3.	CAPITULO III MATERIAL Y MÉTODOS.....	44
3.1.	Material	44
3.1.1	Población y Muestra	44
3.1.2.	Unidad de Análisis	44
3.2.	Método.....	44
3.2.1	Tipo de Investigación	44
3.2.2.	Diseño de Investigación	44
3.2.3.	Variables de estudio y Operacionalización	45
3.2.4.	Instrumentos de recolección de Datos	48
3.2.5.	Técnicas de procesamiento de datos.....	51
3.2.6.	Técnicas de análisis de datos.....	59

4.	CAPITULO IV RESULTADOS.....	67
4.1.	Resultados.....	67
4.2.	Discusión de Resultados	68
5.	CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
5.1.	Conclusiones	72
5.2.	Recomendaciones.....	73
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
7.	ANEXOS.....	76

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

En la tesis doctoral de Gualda, Emilio (2002), nos dice que la fibra óptica es un medio de transmisión de información que presenta pérdidas muy bajas, alrededor de 0.2 dB/Km, y ofrece la posibilidad de utilizar centenares de Gigahercios en su ancho de banda. Sin embargo, el aprovechamiento de la capacidad de la fibra depende también de un efecto físico que es la distancia.

Según (Awduche, 2001) las actuales redes de transporte ópticas de los operadores de comunicaciones emplean sistemas de multiplexación de longitud de onda (WDM) ofreciendo altas velocidades de transmisión, reducción de costos en la instalación de fibra óptica al poder transportar varias longitudes de onda dentro de una sola fibra. Algunos parámetros a tener en cuenta que intervienen en el enlace óptico es la distancia máxima sin amplificación.

Tomasi, Wayne (2003) nos dice que la longitud de los enlaces, es uno de los factores que tienden a degradar parámetros de transmisión importantes tales como, el retardo de la información que es recibida. Es por ello que para tratar de vencer estas limitaciones se emplean amplificadores dopados de erbio (EDFA) dentro del enlace óptico.

En su Tesis Doctoral Reyes, José (2015), nos dice que los amplificadores EDFA son utilizados dentro de los enlaces ópticos como amplificadores ópticos de potencia, preamplificadores y fundamentalmente, amplificadores en línea para compensar periódicamente (distancias entre los 50 km y 100 km) la atenuación óptica.

Según López, A. (2014) nos dice que la ganancia típica del EDFA está en torno a los 25dB, aunque experimentalmente se logrado alcanzar los 51 dB. Sin embargo, no se amplifican todas las longitudes de onda por igual, pero si se amplifica por igual la señal y el ruido.

Gualda, E. (2002) explica que el uso de los amplificadores EDFA introduce nuevos efectos que se deben tomar en cuenta al momento de diseñar un enlace. Los principales inconvenientes son que introduce ruido en la propagación de la señal, la ganancia depende de la potencia total de la entrada y tampoco presenta una figura plana, lo que nos puede llevar a considerar que cada canal de un sistema WDM sufre ganancias distintas. Y este problema se agrava cuando cierto número de amplificadores se encadenan.

López, A. (2014) también indica que parámetros como la separación de señal ruido óptico (OSNR) y tasa de error de bit (BER) en un sistema WDM son relevantes para el tráfico de datos, sin embargo, según lo investigado, no se han encontrado estudios para poder estimar la influencia del aumento del número de amplificadores EDFA sobre parámetros específicos de performance como BER y OSNR.

Tomando en cuenta que la distancia es un parámetro importante que influye en la atenuación de la señal en un sistema óptico y que el número de amplificadores EDFA influye sobre la señal ruido y la tasa de error de bit. La presente investigación se orienta a utilizar una herramienta de simulación con la finalidad de estimar la influencia del número de amplificadores EDFA y la distancia entre estos, sobre los parámetros BER y OSNR en un enlace WDM.

1.2. Delimitación del problema

La presente investigación se delimita al análisis de la influencia del aumento del número de amplificadores EDFA y a la distancia entre estos, sobre los parámetros de BER y OSNR de un enlace óptico WDM, mediante una herramienta de simulación.

1.3. Características y Análisis del Problema

a. Ruido Interno de los amplificadores dopados de erbio (EDFA) influyen sobre los parámetros de transmisión de señales ópticas.

b. Dificultad para un análisis experimental y teórico de la influencia del aumento del número de amplificadores dopados de erbio (EDFA) en un enlace óptico.

Análisis de las características del problema

a. Ruido Interno de los amplificadores dopados de erbio (EDFA) influyen sobre los parámetros de transmisión de señales ópticas.

Para un sistema de comunicaciones óptico, las señales ópticas enviadas por el transmisor son atenuadas en su trayecto por el filtro óptico, la fibra óptica, los conectores, los empalmes y desde luego la distancia. La suma de todas las pérdidas posibilita la detección incorrecta de la señal. Por lo tanto, es necesario garantizar un nivel de potencia aceptable que se consigue mediante la amplificación de la señal. En la actualidad los amplificadores de fibra dopados de erbio (EDFA) son elementos muy importantes para las comunicaciones ópticas.

Una de las deficiencias primarias que provoca errores en las comunicaciones ópticas es el ruido. El ruido es una señal no deseada que se mezcla en la transmisión que se quiere realizar y además es un componente relacionado con la distorsión. La distorsión que produce el ruido en una determinada comunicación depende de su potencia, de su distribución espectral respecto al ancho de la banda de la señal, y de la propia naturaleza de información que transporta. Esta relación señal ruido se la define como SNR, que es la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido en un punto determinado en un canal de transmisión, además cuanto mayor es el valor de esta relación, mayor será la calidad de la señal recibida. Esta relación señal ruido para un enlace óptico se define como OSNR. El OSNR se define como la relación de la potencia óptica por canal y la potencia de ruido, antes que la señal llegue al receptor. (Gualda, 2000)

Otro indicador de calidad es la tasa de error de bit (BER), el cual representa el número de bits que han sido transmitidos erróneamente. (Gualda, 2000).

En las redes de comunicaciones ópticas, la monitorización del nivel de ruido para garantizar su rendimiento se ha convertido en un factor clave. El parámetro más utilizado es la relación señal ruido óptico (OSNR), debido que permite monitorizar de una forma rápida y sencilla la calidad de la comunicación en cualquier punto de red y sin requerir demultiplexación. (C. Florida 2008)

b. Dificultad para un análisis experimental y teórico de la influencia del aumento del número de amplificadores dopados de erbio (EDFA) en un enlace óptico.

Para analizar los sistemas ópticos WDM se requiere equipos muy sofisticados y de muy alto costo. La realidad se basa en que no tenemos acceso a las instalaciones de empresas que manejan estos equipos de medición, debido a la posibilidad que sean perjudicados. Por este motivo, se usará un simulador de enlaces del sistema óptico (Optisystem), simplificando así el trabajo y poder llegar a tener una interpretación real de lo que ocurre en un enlace óptico.

1.4. Formulación del Problema

¿Cómo influye el aumento de amplificadores EDFA y la distancia entre estos, sobre los parámetros BER y OSNR en un enlace óptico WDM?

1.5. Formulación de la Hipótesis

Los parámetros BER y OSNR se degradan con el aumento del número de amplificadores EDFA y la distancia entre éstos, en un enlace óptico.

1.6. Objetivos del estudio

1.6.1. Objetivo General

Realizar una estimación de la influencia del número de amplificadores EDFA y la distancia entre estos, sobre los parámetros BER y OSNR de un enlace óptico WDM utilizado en una herramienta de simulación.

1.6.2. Objetivos específicos

- Estimar mediante una herramienta de simulación, los parámetros de OSNR y BER de un sistema WDM que utiliza amplificadores dopados de erbio.
- Comparar mediante un análisis de tendencia, los parámetros de OSNR resultante de la simulación versus la cantidad de amplificadores utilizados y la distancia entre estos.
- Comparar mediante un análisis de tendencia, los parámetros de BER resultante de la simulación versus la cantidad de amplificadores utilizados y la distancia entre estos.

1.7. Justificación del Estudio

1.7.1. Importancia de la investigación.

Desde el punto de vista académico, el presente trabajo servirá como antecedente para futuras investigaciones relacionadas con los sistemas WDM en nuestro país, además permitirá realizar una simulación de multiplexación en longitudes de onda, que ayudará a entender, conocer y analizar las influencias del número de amplificadores EDFA, sobre los parámetros de BER y OSNR de estos sistemas.

1.7.2. Viabilidad de la investigación

La presente investigación es viable porque se cuenta con la información necesaria y con los recursos humanos, financieros, materiales, tiempo y conocimientos para desarrollar la presente investigación.

1.8. Limitaciones del estudio

1.8.1. Limitaciones del estudio

La presente investigación está limitada a realizarse únicamente como simulación del sistema WDM, ya que la oportunidad de trabajar con los equipos adecuados para poder analizar las influencias del número de amplificadores EDFA, sobre los parámetros de BER y OSNR es muy complicado debido al costo para obtenerlos o la dificultad de acceder a una red de transporte de fibra óptica para el estudio de éste mismo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Estudio y simulación de la propagación de solitones en una fibra óptica monomodo.

En la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Gabriela Poveda y Cristhian Carrera (2015) realizan un estudio sobre ondas solitarias (solitones) propagadas sobre un sistema óptico con distancias mayores a 20 000 Km considerando la longitud de onda y la potencia de las señales, con la finalidad de obtener resultados aproximados para un enlace real. En el presente trabajo se realizan simulaciones mediante el software Optisystem y fórmulas matemáticas que nos permiten trabajar con datos ideales sobre un sistema óptico. De los resultados se obtiene que en fibras sin pérdida de potencia pico la señal transmitida se conserva, así como el perfil de la señal tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia a lo largo de la transmisión, muestra una pequeña disminución de la potencia pico de la señal provocando un desequilibrio entre el balance que debe sostenerse entre los efectos dispersivos y no lineales de la fibra para la existencia de solitones. De este estudio obtenemos los parámetros para simular amplificadores EDFA en un sistema óptico de larga distancia, ya que en este trabajo se emplean los amplificadores para aumentar la potencia de la señal y tener como resultado cuanto aumenta o se atenúa a cierta distancia. Así también tenemos valores ideales que nos permiten obtener resultados aproximados a un sistema real.

Evaluación del fragmento espectral como técnica de generación de portadoras ópticas.

En la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, Colombia, Lizet Hernández Vargas y Erika Julieth Vanegas (2017) realizaron un estudio sobre la necesidad de reducir los costos en un enlace óptico que pueda transmitir múltiples portadoras. Ésta problemática se puede solucionar mediante la utilización de un dispositivo con gran anchura espectral como generador de portadoras, que por sus características permite implementar la técnica de *Slicing* con el fin de que bajo una sola fuente se generen diferentes longitudes de onda para así transmitir datos

modulados con la técnica WDM. Lo cual permite reducir costos de equipamiento pero a cambio se perderá alcance y eficiencia en la transmisión de datos, esta relación debe tenerse en cuenta a la hora de realizar la validación del esquema de transmisión.

Para enlaces de fibra óptica de larga distancia las pérdidas que limitan eficiencia de transmisión son principalmente: la atenuación debida a las características tanto de fabricación de la fibra como del medio en el que se transmite, la dispersión cromática dada por el índice de refracción de la fibra, las pérdidas por efectos no lineales, las pérdidas por absorción inherentes a la fibra como por iones OH y por acoplamiento. Por lo que se necesitará evaluar las prestaciones de la transmisión al momento de utilizar una sola fuente para multicanalización en larga distancia. Entonces se evaluará el fragmentado espectral como técnica de generación de portadoras ópticas. Para evaluar el comportamiento de los enlaces a larga distancia WDM, se realizaron pruebas por medio del software Optisystem. Las pruebas fueron realizadas a una distancia de 200 km con las cuales se caracterizaron los comportamientos de los diseños actuales de transmisión y se evaluó sobre las mismas el alcance de la implementación del fragmentado espectral de una fuente ASE como método de generación de portadoras a diferentes velocidades de transmisión entre los 10Gbps y los 32Gbps. Para el diseño de este enlace se tomó en cuenta un sistema de 5 etapas, cada una de 40 km ya que para enlaces de este tipo es importante controlar los fenómenos de dispersión de manera progresiva, ya que si se realizara en una sola etapa no sería posible controlarlas por su característica de comportamiento no lineal. Como conclusión de la tesis, se aprecia que la reducción de costos (indagados con diversos fabricantes) en lo que respecta al bloque de transmisión fue de un 46.7% y para el sistema total fue de 18,9% en comparación con el sistema de referencia. De esta tesis obtenemos parámetros para simular un enlace WDM de larga distancia utilizando un multiplexor, un demultiplexor, un generador de portadora y amplificadores EDFA. Así como también el comportamiento de las señales ópticas a una distancia de 200 km en respecto a su atenuación y amplificación de la señal.

Sistemas de comunicación por Fibra Óptica de Alta Capacidad

En el departamento de Física y Matemática del Instituto Tecnológico de Buenos Aires Argentina, Diego F. Grosz (2014) realizó una investigación sobre el funcionamiento de las comunicaciones ópticas de alta capacidad con el propósito de demostrar el comportamiento de los parámetros BER y OSNR en un enlace WDM de larga Distancia usando amplificadores EDFA a distancias constantes, para determinar valores semejantes a los reales uso fórmulas matemáticas.

Obteniendo como resultado que los amplificadores colocados al final de cada segmento de fibra compensan la pérdida del segmento precedente, la atenuación en una distancia de 100km de fibra óptica es típicamente 22dB, para esto los amplificadores EDFA tienen una ganancia entre 17 a 24dB, importante anotar que el amplificador no solo amplifica la señal si no también introduce ruido, de esta manera con el incremento de amplificadores en un enlace de fibra óptica se degrada la relación señal – ruido, sumado a ello la dispersión cromática, produciendo como consecuencia la superposición de pulsos. Este estudio nos permite determinar cuántos amplificadores (EDFA) usar, en una determinada distancia sin tener degradación de los parámetros BER Y OSNR, y gracias a los amplificadores EDFA podemos alcanzar distancias transmitidas mucho mayores en un enlace de Fibra Óptica WDM.

Simulación de señales distribuidas en RoF para redes WiMAX a través de la modulación OFDM y 64-QAM

En la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, el Ing. Juan Carlos Navarro Viveros, presenta la siguiente tesis con el propósito de simular señales que son distribuidas en radio sobre fibra (RoF) para diferentes escenarios a través de redes WiMAX utilizando modulaciones OFDM y 64-QAM. Esto se realiza mediante las herramientas de simulación Matlab/Simulink y Optisystem. Donde se desea comprobar la degradación de la señal a grandes distancias. Este trabajo simula la transmisión WiMAX de una señal de 54 Mbps a través de RoF en SMF para una distancia de 180 km y se demostró el alto consumo de energía y longitud de transmisión limitada para WiMAX a través del aire. El resultado de este trabajo nos

permite usar sus datos ingresados en el simulador Optisystem para los amplificadores EDFA y, ver el comportamiento de la atenuación y amplificación para tramos desde los 10 km hasta los 200 km.

Nuevos esquemas de recepción coherente multipuerto para comunicaciones ópticas

En la universidad de Málaga, el ingeniero Pedro Reyes Iglesias (2015), realiza una tesis doctoral la cual se centra en el estudio y evaluación numérica de nuevos esquemas de recepción coherente multipuerto de sistemas de comunicación por fibra óptica. Se ha desarrollado y validado una herramienta para la simulación numérica del canal óptico en régimen no-lineal bajo transmisión multicanal WDM. Asimismo, se ha analizado la capacidad de los diferentes esquemas de recepción para soportar el elevado régimen binario por canal de 100 Gbps que se plantea en la futura actualización de la infraestructura óptica troncal. Los resultados numéricos confirman que, incluso en ausencia de un dispositivo de demultiplexión o filtrado óptico (recepción '*colorless*'), aspecto clave para el futuro desarrollo de las redes reconfigurables, el esquema propuesto mejora ostensiblemente el rango dinámico y ancho de banda de operación respecto al receptor convencional. Finalmente se propone y verifica numéricamente una nueva métrica, basada en la aplicación de la norma de Frobenius a la caracterización matricial del receptor, que permite estimar la penalización en sensibilidad producida por sus imperfecciones. El interés de esta métrica es que define un interfaz preciso para la evaluación de las prestaciones del *downconverter* con diversidad de polarización sin tener que considerar los algoritmos habituales del posterior procesamiento digital. Esta métrica se ha aplicado con éxito al establecer, por primera vez, unas especificaciones realistas de los separadores de polarización integrados de un receptor coherente digital con diversidad de polarización.

De este estudio podemos obtener que los amplificadores EDFA nos permiten compensar atenuaciones óptica acumuladas sobre una distancia de 50 – 80 km de forma totalmente transparente a la técnica de modulación. Y definiciones teóricas como que los amplificadores EDFA se basan en un mecanismo de emisión

estimulada similar al del láser, el bombeo de una fuente óptica externa (por general a 980 nm) genera un estado de inversión de portadores en los iones de Erblio (Er^{3+} dopantes del núcleo en un tramo de fibra de decenas de metros). De este modo, se puede lograr una ganancia de hasta 40 dB en una banda de amplificación que cubre la banda-C o banda-L (del orden de 100 nm ó 13 THz), y una máxima potencia óptica promedio del orden de 20 dBm, valores suficientes para, por ejemplo, compensar simultáneamente la atenuación de 80 canales de 1 dBm tras 100 km de fibra. También, mediante fórmulas matemáticas, obtenemos que mínima figura de ruido es de 3 dB pero en la práctica los amplificadores EDFA presentan figuras de ruido próximas a 5 dB. En la práctica los amplificadores EDFA se insertarán periódicamente en el enlace con una ganancia $G = e^{\alpha L_{aa}}$ para la compensación de las pérdidas acumuladas en un tramo de fibra de longitud L_{aa} (del orden de 50 km a 100 km). La restauración periódica del nivel de potencia óptica de señal a la salida de cada amplificador óptico irá acompañada de la paulatina acumulación del ruido ASE introducido en cada uno de ellos.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1 WDM

La multiplexación por división de onda (WDM, Wave División Multiplexing) la multiplexación y la demultiplexación involucran señales luminosas transmitidas con longitudes de onda entre 1300 nm y los 1600 nm a través de canales de fibra óptica. La idea es combinar distintas señales sobre frecuencias diferentes. Sin embargo, la diferencia es que las frecuencias son muy altas.

El proceso del sistema WDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda) es acoplar la luz de dos o más longitudes de onda discretas para que entre y salga de una fibra óptica. La tecnología WDM es un proceso en el que distintas fuentes de información (canales) se propagan por una fibra óptica a distintas longitudes de onda, que no interfieren entre sí en esencia, cada longitud de onda forma un "carril" óptico de la supercarretera de

transmisión, y mientras más carriles haya, se puede conducir más tráfico por un solo cable de fibra óptica. (Tomasi, 2003).

El mecanismo de WDM es una tecnología muy compleja, pero sin embargo la idea es muy simple. Se quiere combinar múltiples haces de luz dentro de una única luz en el multiplexor y hacer la operación inversa en el demultiplexor. Combinar y dividir haces de luz se resuelve fácilmente un prisma. Como la física básica que un prisma curva un rayo de luz basándose en el ángulo de incidencia y la frecuencia. Usando esta técnica, se puede hacer un multiplexor que combine distintos haces de luz de entrada, cada uno de los cuales contiene una banda estrecha de frecuencia, en un único haz de salida con una banda de frecuencia más ancha. También se puede hacer un demultiplexor para hacer la operación para revertir el proceso como se ve en la siguiente figura.

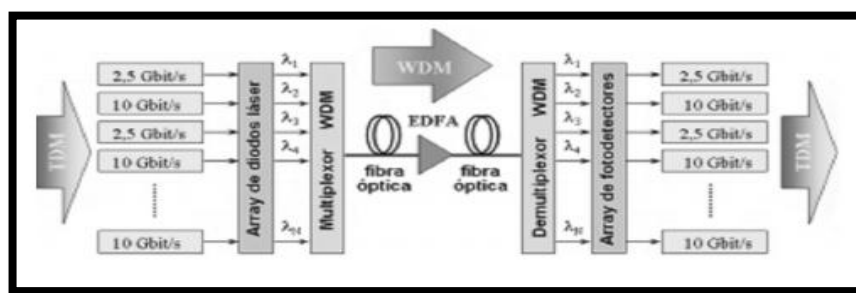


Figura 1: Diagrama de tecnología WDM

Fuente: López, A. (2014)

Los métodos tradicionales de multiplexación de señales sobre fibra óptica utilizando luz coherente son Multiplexación por División en la Frecuencia (Frequency Division Multiplexing, FDM) y Multiplexación por División el tiempo (Time Division Multiplexing, TDM). Conceptualmente, esta forma de multiplexación es similar a FDM (Multiplexación por división de frecuencia), utilizada en sistemas satelitales y de microondas. Mientras que FDM consiste en transmitir varias señales al mismo tiempo a través de un solo canal de banda ancha, modulando primero cada una de ellas en una subportadora distinta y, posteriormente, reuniéndose para formar una sola

señal, WDM reúne diferentes longitudes de onda para formar la señal que se transmitirá. De manera similar a otras formas de multiplexación, WDM requiere que cada longitud de onda sea debidamente espaciada de las demás, con el objeto de evitar la interferencia intercanal.

En cuanto a TDM lo esencial es incrementar la capacidad de la red añadiendo canales que subdividen aquellos que ya existían anteriormente, teniendo en cuenta el inconveniente de que el equipamiento requiere mayor costo y una alta complejidad en los protocolos de señal (Aguilera, 2012).

En WDM transmite más señales por una misma fibra sin complicaciones de protocolos ni de tiempo. A cada canal en particular se le asigna una longitud de onda específica por medio de un convertidor electro-óptico, el cual convierte la señal eléctrica en la energía luminosa que se transmite por toda la fibra de forma simultánea. Esta asignación se encuentra estandarizada en las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones y cada canal puede transmitir señales de diferentes velocidades y formatos basándose en diferentes protocolos de comunicación como SONET/SDH, ATM, PDH e IP (ITU-T, 2002).

2.2.1.1. Tipos de WDM

Existen esencialmente tres tipos de WDM según López (2014) que se implementan según los requerimientos de la red que se desea diseñar. Estas variantes son:

➤ Multiplexación por División Aproximada de Longitudes de Onda (Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM).

Los sistemas CWDM requieren de un espaciamiento entre longitudes de onda, mayor o igual a 20 [nm]. Esta holgura permite utilizar componentes de no tan alta precisión, lo que hace que este sistema sea bastante menos costoso que DWDM, al eliminar la necesidad de algunos componentes muy sofisticados y precisos. CWDM es una

implementación de WDM para redes de corto y mediano alcance. Actualmente, CWDM puede operar con 8 longitudes de onda, cada una operando a un Bit Rate que va desde los 156 [Mbps] a los 10 [Gbps], logrando anchos de banda de hasta 100 [Gbps], utilizando múltiples longitudes de onda.

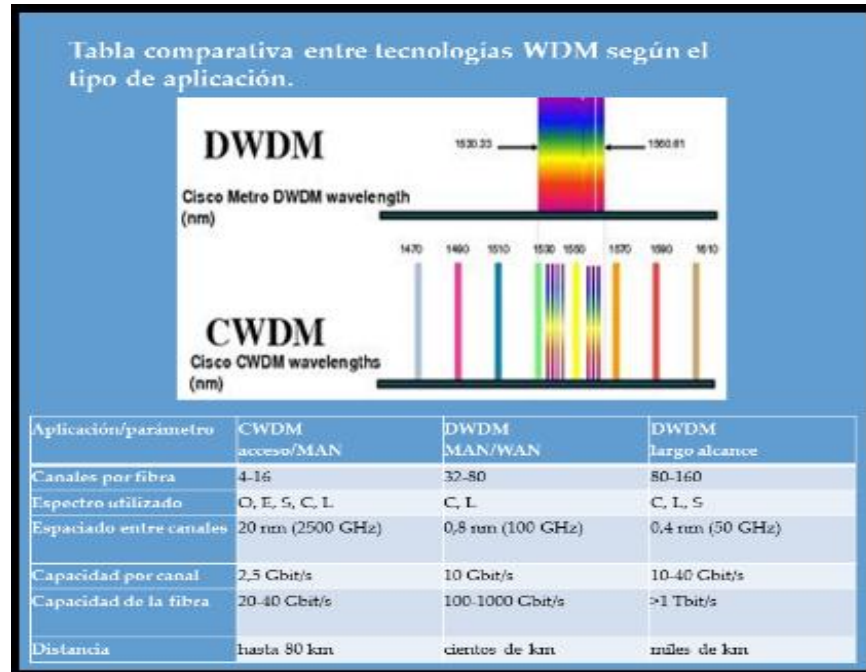
➤ **Multiplexación por División de Longitudes de Onda Densa (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM).**

Las principales ventajas que ofrece DWDM se enlistan a continuación:

- Aumenta dramáticamente la capacidad de un punto a otro de la red de fibra óptica, lo cual es considerado la aplicación clásica de DWDM. Esto se debe principalmente a la posibilidad de transmitir varias señales dentro de una sola señal y a las altas tasas de transmisión que soporta.
- Permite transportar cualquier formato de transmisión en cada canal óptico. Así, sin necesidad de utilizar una estructura común para la transmisión de señales, es posible utilizar diferentes longitudes de onda para enviar información síncrona o asíncrona, analógica o digital, a través de la misma fibra.

➤ **Permite utilizar la longitud de onda como una nueva dimensión, además del tiempo y el espacio, en el diseño de redes de comunicación.**

Tabla 1.6. Comparación de Tecnologías WDM según el tipo de Aplicación



Fuente: Laude (2005)

DWDM es una tecnología que transmite varias longitudes de ondas de luz simultáneamente sobre una fibra óptica en forma paralela. Cada señal se transmite con su propia banda de color, de manera que se define una longitud de onda exclusiva para cada fuente de señal.

DWDM es una componente importante de las redes ópticas, que permite la transmisión de voz, video y datos (Voz sobre IP, Video IP, ATM), además de señales SDH a través de la capa óptica. Estos sistemas permiten la transmisión de decenas de Tbps.

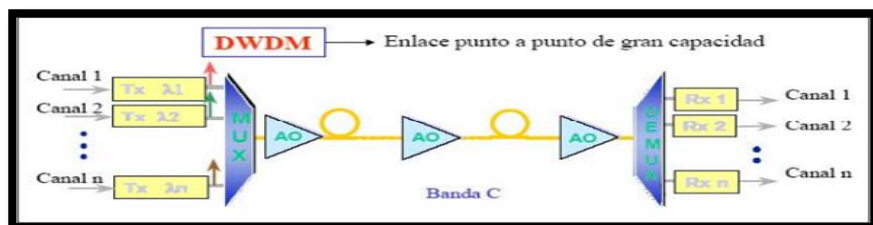


Figura 2: Características a nivel físico de DWDM

Fuente: Buelvas (2009)

A pesar de que DWDM se conoce hace mucho tiempo, al inicio, sus aplicaciones estuvieron restringidas a dos o cuatro canales como máximo (WDM). Actualmente los avances tecnológicos permiten que longitudes de ondas de luz paralelas puedan ser densamente empaquetadas e integradas en un sistema de transmisión con señales de extrema alta frecuencia. Los espaciamientos actualmente utilizados son de 200 GHz para aplicaciones metropolitanas y de 100 GHz para otro tipo de redes.

El medio más común utilizado por DWDM es un par de fibras ópticas; una para transmisión y la otra para la recepción. Sin embargo, existen sistemas DWDM que utilizan una fibra bidireccional, pero estos, sacrifican capacidad al reservar una banda para prevenir la mezcla de las señales de entrada y de salida.

La disponibilidad de tecnologías más maduras, en demultiplexores y Amplificadores de Fibra Óptica Dopada con Erblio EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) ha permitido que más de treinta canales puedan estar disponibles en forma comercial. Los demultiplexores utilizan un nuevo componente de filtro llamado Fiber Grating, que consiste en un tramo de fibra óptica donde el índice de refracción ha sido permanentemente modificado. Esto ha permitido la creación de un componente, que permite actuar como reflector dependiente de las longitudes de onda. El Fiber Grating crea un filtro de ancho de banda que funciona como un espejo para las longitudes de onda.

Los amplificadores EDFA, al igual que los demultiplexores, han permitido el desarrollo comercial de DWDM, proporcionando un medio para la amplificación de longitudes de onda en forma simultánea. Esta amplificación se realiza agregando iones de erbio a

una fibra, proceso llamado doping. La estructura atómica del erbio permite la amplificación requerida para longitudes de onda que operan en la región de 1550 nm. El EDFA directamente amplifica las señales ópticas y no depende de las frecuencias, por tanto, tiene la ventaja de que no es necesario regenerar la señal, permitiendo alcanzar distancias mayores sin regeneración eléctrica de la señal.

2.1.1.2. Componentes básicos

La calidad de la multiplexación por división en longitudes de onda depende mucho de la tecnología de dispositivos ópticos que se utilicen. Este tipo de sistemas básicamente se forma con:

- **Fuentes ópticas:** Convierten la señal eléctrica en energía luminosa y la emiten con diferentes longitudes de onda.
- **Multiplexores ópticos:** Combinan la energía luminosa emitida por las fuentes ópticas.
- **Demultiplexores ópticos:** Dispositivo que separa la longitud de onda de cada canal. Tipos de multiplexores/demultiplexores:
 - 1) Los de rejilla de difracción.
 - 2) Los de filtros de interferencia.
 - 3) Los de prisma.
- **Medio de transmisión:** El medio utilizado es la fibra óptica que lleva la información hasta el receptor
- **Acopladores:** Dispositivos que combinan la luz en una fibra, o la separan de esta.
- **Amplificadores ópticos:** Incrementan la potencia de la señal óptica

➤ **Detectores:** Convierten la señal óptica de nuevo al dominio eléctrico y recuperan los datos que son transmitidos a través del sistema de comunicaciones ópticas.

Las características principales de estos componentes son:

Bajas pérdidas de inserción, baja diafonía, facilidad de conexión, fácil adaptación de conectores para lograr una transmisión directa, tamaño pequeño, alta confiabilidad.

2.1.1.3. Fuentes ópticas

El diodo láser es un dispositivo semiconductor similar a los diodos LED pero que bajo las condiciones adecuadas emite luz láser. Estas fuentes ópticas tienen además la ventaja de que introduciendo impurezas o dopantes, se puede modificar la frecuencia de emisión. El compuesto más utilizado en el rango de longitudes de onda de 1,1 a 1,6 μm , es el InGaAsP.

- Los diodos láser tienen como valores típicos, una potencia de salida de 20 mW, frecuencia de modulación de 10 GHz y anchura espectral de 0,7 nm. Por ser fuentes de luz coherentes, son necesarios para la utilización de detectores coherentes, los cuales dan lugar a una mejora de la sensibilidad y selectividad del sistema. Son utilizados en las fibras multimodo.

- Los fotodiodos emisores de luz se caracterizan por una potencia de salida de 1mW, frecuencia de modulación de 50 GHz y anchura espectral de 50 nm. Son siempre utilizados en fibras monomodo (Agraval, 1995). Son más baratos que los LED y su tiempo de vida operativa es mayor. Los LED más utilizados son los de emisión superficial, que con un correcto diseño pueden utilizarse en sistemas de hasta 500 Mb/s, a costa de perder potencia de emisión. Los LED de emisión lateral, suponen una mejora de prestaciones, aumentando la

potencia acoplada a la fibra y una reducción de la anchura espectral, presentando sin embargo inconvenientes como la complejidad de fabricación y alimentación de los diodos láser.

2.1.1.4. Parámetros fundamentales del transmisor

Es necesario citar los parámetros más importantes del transmisor con el objetivo de escoger el que mejor se ajuste a las necesidades del diseño que se requiera implementar.

- Potencia máxima emitida. La potencia que emite la fuente óptica del transmisor.
- Máxima razón de datos o ancho de banda. La máxima razón de transmisión en bps o la máxima respuesta de frecuencia en Hz.
- Tiempo de subida:
 - Tiempo de subida óptico. Tiempo que demora el pulso de la señal luminosa en alcanzar del 20% el 80% del valor correspondiente a su amplitud máxima.
 - Tiempo de subida eléctrico. Tiempo que demora el pulso de la señal eléctrica en alcanzar del 10% el 90% del valor correspondiente a su amplitud máxima.
- Tipo de conector. Eléctrico y óptico; especificar el nivel de atenuación que se introduce.
- Tipo de la señal de código. Se refiere al tipo de formato de la señal: RZ, NRZ, código Manchester o MBNB, etc.
- Retardo. Tiempo que tarda la señal en el transmisor en nanosegundos.
- Fuente de alimentación. Voltaje requerido para alimentar el transmisor.

2.1.1.5. Multiplexores y demultiplexores ópticos

En WDM son necesarios dispositivos eficaces para introducir por la fibra las distintas longitudes de onda, que provienen de las fuentes de luz y los demultiplexores son los que discriminan las diferentes longitudes de onda que provienen del haz multiplexado previamente. En la práctica la demultiplexación se realiza antes de la detección de la luz debido a que los fotodetectores son de banda ancha y no pueden reconocer una solo λ .

Los multiplexores y los demultiplexores pueden ser de diseño pasivo o activo. El diseño pasivo se basa en prismas, rejillas de difracción, o filtros mientras que el diseño activo combina dispositivos pasivos y filtros sintonizables. Los principales retos en estos dispositivos son minimizar la diafonía y maximizar la separación de cada canal. La diafonía es una medida de cuánto están separados los canales, mientras que la separación de canales se refiere a la posibilidad de distinguir cada longitud de onda (Cisco, 2001).

2.1.1.6. Medio de transmisión

En sistemas WDM el medio de transmisión principal utilizado es la fibra óptica la cual se encarga de guiar, conducir, entregar la señal transmitida de datos cuya información está contenida en la señal luminosa que viaja a través de la fibra al receptor donde se realiza la detección de la información contenida en el mensaje proveniente del emisor. Esta señal luminosa debe ser guiada hasta el receptor con la atenuación mínima posible de forma tal que las pérdidas de información también sean mínimas o que la probabilidad de error de bits de la señal recibida con respecto a la transmitida sea la menor posible.

Para seleccionar una fibra adecuada donde se pretende utilizar WDM se requiere que la fibra sea compatible con todas las λ utilizadas

en la red y con el propio sistema WDM en la región de 1550 nm. En la selección de la fibra se evalúan diversos factores. Los tres efectos más importantes son la atenuación, la dispersión y la no linealidad.

2.1.1.7. Acopladores

El término acoplador abarca todos los dispositivos que combinan la luz en una fibra, o bien la separan de ésta. Un divisor es un acoplador que divide la señal óptica procedente de una fibra en dos o más fibras. La razón de división es el porcentaje de la potencia que viaja por cada una de las salidas. Para un divisor de dos puertos, la razón de división más común es 50:50, aunque pueden ser fabricados divisores de cualquier razón.

Un combinador es el dispositivo inverso del divisor. Una señal de entrada al combinador sufre una pérdida de alrededor de 3 dB de potencia. Un acoplador 2×2 , en general, está constituido por un combinador 2×1 seguido por un divisor 1×2 , cuyo efecto es dispersar las señales desde las dos fibras de entrada a las dos fibras de salida. Una implementación típica, es el acoplador en derivación bicónica fusionada, que consiste básicamente en dos fibras ópticas o guías rectangulares fusionadas. Además de la división de potencia 50:50 en el acoplador, la señal experimenta ciertas pérdidas de retorno. Si la señal entra por una entrada del acoplador, alrededor de la mitad de la potencia de la señal va por cada una de las salidas. Sin embargo, una cantidad de potencia es devuelta por el acoplador, típicamente entre 40 y 50 dB. Otro tipo de pérdidas son las de inserción, que ocurre, por ejemplo, cuando los ejes del núcleo de la fibra y del acoplador no están alineados.

Los acopladores englobados en una configuración Mach-Zehnder, han sido muy utilizados en tecnologías comerciales como dispositivos de multiplexación en longitud de onda. Estos dispositivos de

multiplexación, al igual que los basados en rejillas de Bragg, son más baratos que otras tecnologías propuestas y son más fáciles de mejorar en cuanto a incrementos en el número de canales a multiplexar, porque emplean el mismo tipo de bloques para 4, 8, 16 y 32 canales. (Agraval, 1992)

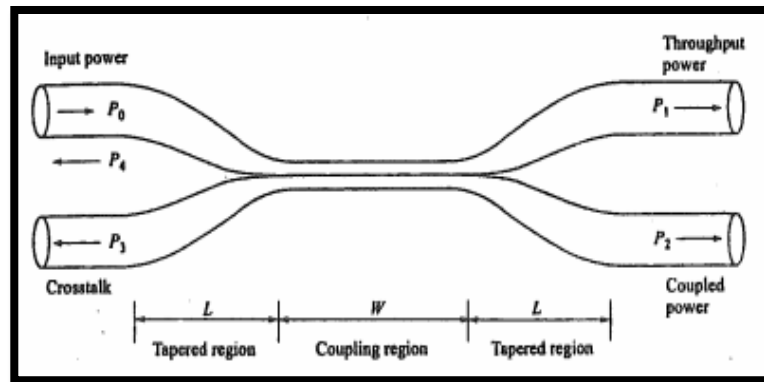


Figura 3: Acoplador en derivación bicónico

Fuente: Agraval (1992).

2.1.1.8. Amplificadores

Los amplificadores ópticos difieren de los amplificadores optoelectrónicos en que sólo actúan elevando la potencia de la señal, no reconstruyendo su forma temporal. De este modo, la amplificación óptica supone una total transparencia de los datos, es decir, es independiente del formato de modulación de la señal.

Las redes digitales actuales, como por ejemplo SONET y SDH, aunque utilizan la fibra óptica como único medio de transmisión, todavía se basan en amplificación optoelectrónica. En ésta se detecta la señal luminosa para convertirla en corriente eléctrica, amplificándola por vía electrónica y luego, con esta corriente amplificada y filtrada, se modula un láser y se introduce la señal de nuevo en la fibra.

En un sistema WDM, cada longitud de onda necesitaría ser separada antes de ser amplificada electrónicamente, y después recombinada antes de ser retransmitida. Así, para eliminar la necesidad de multiplexores y demultiplexores ópticos en los amplificadores, los

amplificadores ópticos deben regenerar la señal óptica sin convertirla previamente en una señal eléctrica. Además, gracias a su alta ganancia y potencia de salida, se consigue duplicar o triplicar la distancia óptima entre repetidores eléctricos. La desventaja es clara: se amplifica el ruido además de la señal, degradándose la relación señal a ruido en el receptor.

Los amplificadores ópticos utilizan el principio de la emisión estimulada. Los dos tipos básicos de amplificadores ópticos son los amplificadores láser semiconductores y los amplificadores dopados con tierras raras, que serán presentados a continuación. Las características más relevantes de estos amplificadores

Tabla 1.8. Características típicas de los amplificadores

Tipo de amplificador	Región de ganancia	Ancho de banda de ganancia	Ganancia
Semiconductor	cualquiera	40 nm	25 dB
EDFA	1.525-1560 nm	35 nm	25-51 dB
PDFFA	1.280-1.330 nm	50 nm	20-40 dB

Fuente: Millán, R. (2002).

Un amplificador de semiconductor láser consiste en un láser semiconductor modificado. Una señal débil es enviada a través de la región activa del semiconductor que, vía emisión estimulada, resulta en la emisión desde el semiconductor de una señal más potente y podemos tener enlaces de mayores distancias.

Las ganancias que consiguen los amplificadores de semiconductor actuales son de alrededor de 25 dB, con una saturación de ganancia de 10 dBm. Tienen una sensibilidad a la polarización de 1 dB, y un ancho de banda de alrededor de 40 nm. La gran ventaja de estos amplificadores es que pueden integrarse con otros componentes.

Las limitaciones de la amplificación óptica son: el espectro de ganancias asimétrico de los amplificadores ópticos, es decir, no se amplifican todas las longitudes de onda por igual, y se amplifica por igual tanto señal como ruido. Además, la región activa del amplificador puede emitir fotones espontáneamente, lo cual constituye una fuente de ruido adicional. En definitiva, una señal óptica de múltiples longitudes de onda atravesando una serie de amplificadores ópticos, tendrá la potencia distribuida entre sus diferentes longitudes de onda, desequilibrando progresivamente.

2.1.1.9. Detectores

La misión de un receptor óptico es convertir la señal óptica de nuevo al dominio eléctrico y recuperar los datos que son transmitidos a través del sistema de comunicaciones ópticas. Se distinguen dos tipos de detectores dependiendo de la naturaleza de la modulación de la señal óptica: los detectores incoherentes y los detectores coherentes.

En los receptores que emplean detección directa, o detectores incoherentes, un foto detector convierte el haz de fotones que le llega, modulado en intensidad, en un haz de electrones. El haz de electrones es amplificado y pasa a través de un detector de umbral. El que un bit sea un cero lógico o un uno, depende de si el haz está por debajo o encima del umbral en el tiempo de duración de ese bit. Es decir, la decisión se hace en función de la ausencia o presencia de luz durante el tiempo de bit.

Los dispositivos básicos para la detección óptica son los fotodiodos PN (consistentes en una unión p-n) y el fotodiodo PIN (donde un material intrínseco se ubica entre las regiones p y n del material) [14]. En su forma más simple, el fotodiodo es básicamente una unión p-n en inversa. A través del efecto fotoeléctrico, la luz incidente en la unión

originará la emisión de pares electrón-hueco tanto en las regiones n como la p del fotodiodo. Los electrones creados en la región p se dirigirán a la región n, y los huecos de la región n cruzarán ésta hasta la p, resultando en un flujo de corriente.

La detección coherente es más compleja que la detección directa, permite la detección de señales débiles de un entorno ruidoso. En los sistemas ópticos, sin embargo, es difícil mantener la información de fase requerida para la detección coherente. Puesto que los láseres emiten varias pequeñas bandas espectrales no nulas, la señal transmitida consiste en un número de frecuencias con fases y amplitudes variables. El efecto, es que la fase de la señal transmitida experimenta aleatorias y significativas fluctuaciones en torno a la fase deseada. Estas fluctuaciones de fase dificultan la reconstrucción de la información de fase a partir de la señal transmitida, limitando así la eficiencia de los sistemas de detección coherente.

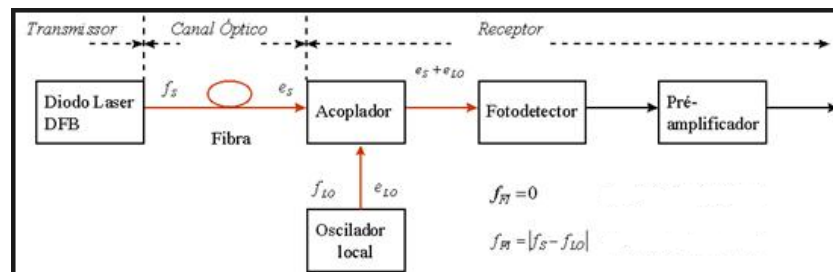


Figura 4: Esquema de detección coherente

Fuente: Millán, R. (1998).

2.2.2. Fibra Óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión, empleado habitualmente en redes de datos y telecomunicaciones, consiste en un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir.

La fibra óptica se ha convertido en el medio de transmisión más atractivo debido a sus cualidades:

- Bajas pérdidas de transmisión y alto ancho de banda. Mientras que parece que no puede rebasarse la capacidad de 1 GHz en el cable coaxial, a través de fibra óptica se podrán llegar a transmitir más de 1 THz, en caso de que la tecnología llegue a proporcionar detectores suficientemente rápidos.
- La baja atenuación de la señal es otra ventaja, consiguiendo distancias entre repetidores superiores a 100 Km en tercera ventana. Las tasas de error de los sistemas de comunicaciones ópticas son menores de 10^{-17} . Por lo tanto, el cable de fibras ópticas puede transportar más datos en mayores distancias, reduciendo el número de equipos, complejidad y coste del sistema.
- Pequeño tamaño y peso. Lo cual facilita la instalación y transporte, frente a los gruesos y pesados cables coaxiales.
- Inmunidad a interferencias. Las fibras ópticas, por su naturaleza dieléctrica, son insensibles a interferencias electromagnéticas.
- Aislamiento eléctrico. Puesto que las fibras ópticas se construyen a partir de silicio, que es un aislante eléctrico, no hay que preocuparse con llevarlos a tierra o por la diafonía eléctrica.
- Seguridad de la señal. La fibra óptica supone una mayor seguridad ante ataques de intrusos en busca de la información transmitida, pues la señal óptica queda muy bien confinada en las guías de ondas, y las pequeñas emanaciones son rápidamente absorbidas por un recubrimiento opaco alrededor de la fibra.
- Abundante presencia de los materiales en la naturaleza. El Silicio, material que principalmente constituye las fibras ópticas, es muy abundante y barato, ya que se encuentra en la arena ordinaria. Lo que si resulta caro es el proceso de purificación de dicho semiconductor.
- Posibilidad de integración. Se están consiguiendo grandes avances en la integración óptica, miniaturizando todos los

componentes que componen el sistema de transmisión, e insertarlos en un chip o pastilla de alrededor de 1 cm^2 de un material adecuado.

2.2.3. Dispersión Cromática

Los dos efectos lineales más importantes que rigen la propagación de la señal en una fibra óptica del tipo monomodo son la atenuación y la dispersión cromática, Gualda (2000), afirma que la magnitud de ambos efectos depende de la longitud de onda de la señal y determinan de manera importante las características de la propagación. La elección de la longitud de onda, o longitudes de onda, centrales de trabajo está estrechamente relacionada con estos dos efectos lineales. Las fibras ópticas utilizadas actualmente, especialmente en sistemas de larga distancia, presentan mínimos de la atenuación en la banda de frecuencias alrededor de 1550 nm, y se diseñan con un perfil de índice adecuado para controlar la dispersión cromática de la fibra. (p. 29).

La dispersión cromática es uno de los factores determinantes de la degradación de las señales que se han presentado en las en el área de las telecomunicaciones basadas en fibra óptica. En esta investigación se presenta un análisis del efecto de la dependencia del índice de refracción del material constitutivo de una fibra, con la frecuencia de la señal óptica. Ésta dispersión elementalmente del modo y los materiales con que fueron fabricados la fibra óptica, y por lo general son dos tipos de fuentes que nos llevan a esta dispersión: la dispersión debida al material y la dispersión debida a la guía de onda.

La dispersión debida al material, proviene de la dependencia en frecuencia que hay en la respuesta de los materiales con respecto a ondas. La dispersión debida a la guía de onda ocurre cuando la velocidad de una onda en una guía de onda depende de su frecuencia debido a razones geométricas, independientemente de cualquier

dependencia en frecuencia de los materiales de los cuales se fabrica. (Ayala, 2011, p. 23).

De manera más específica, la dispersión debida a la guía de onda puede ocurrir para ondas proyectándose a través de cualquier estructura no homogénea, no importando si las ondas están siendo ubicadas en la misma región. La combinación de estas dos fuentes con llevan a la degradación de la señal en fibras ópticas utilizadas en telecomunicaciones.

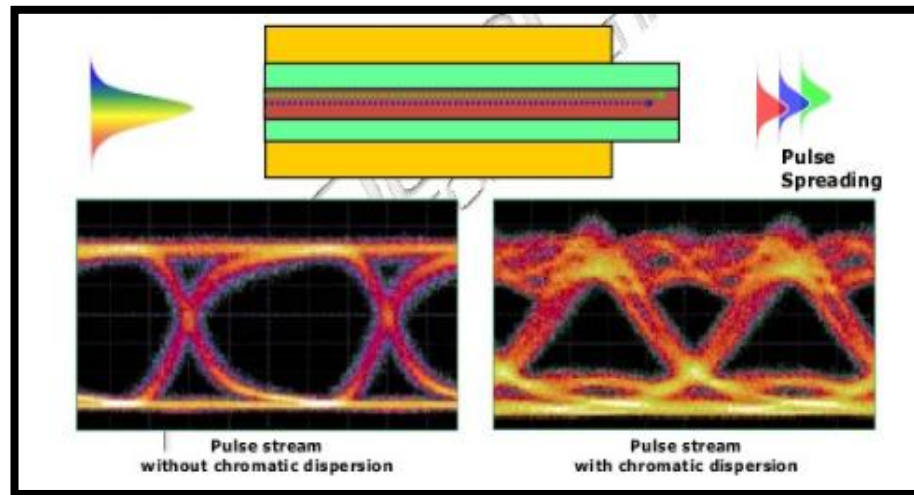


Figura 5: El efecto de la dispersión cromática: amplificación del pulso y cierre del ojo.

Fuente: Optical fibers, cables and systems, ITU (2010)

2.2.3.1. Dispersión Guía de Onda

Para comprender esta componente hay que recordar que la potencia de un modo se propaga parcialmente por el núcleo y parcialmente por el revestimiento.

El índice efectivo de un modo se sitúa entre el índice de refracción del núcleo y del revestimiento, acercándose más a uno u otro dependiendo de cuál sea el porcentaje de la potencia que se propaga por ellos (si la mayor parte de la potencia está contenida en el núcleo, el índice efectivo estará más cerca del índice de refracción del núcleo). Como la

distribución de la potencia de un modo entre el núcleo y el revestimiento depende de la longitud de onda, si la longitud de onda cambia, la distribución de potencia también cambia, provocando un cambio en el índice efectivo o constante de propagación del modo. (Gonzales, 2007, p.14).

2.2.4. Diagrama de Ojo

El diagrama de Ojo o patrón de Ojo, es muy requerido y utilizado para los análisis de formas de ondas en telecomunicaciones digitales, corresponde esencialmente, a un diagrama que muestra la superposición de las distintas combinaciones posibles de unos y ceros en un rango de tiempo o cantidad de bits determinados. Dichas señales transmitidas por el enlace, permiten obtener las características de los pulsos que se propagan por el medio de comunicación, sean estos por medio de fibra óptica, coaxial, par trenzado, enlaces satelitales, etc.

Evalúa los siguientes parámetros:

- La apertura del ojo define el intervalo del tiempo en el que la señal recibida puede ser muestreada sin error a ISI.
- La sensibilidad del sistema a los errores de temporización, está dada por el ancho de la apertura del ojo.
- La separación respecto del valor central, especificado para el instante de muestreo define el margen de ruido del sistema.

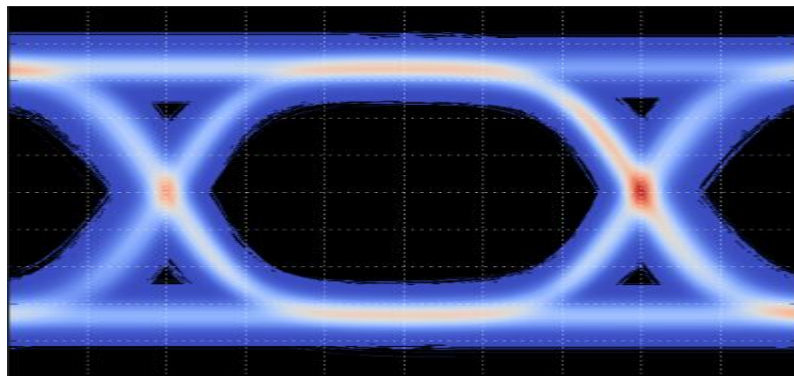


Figura 7: Diagrama de ojo

Fuente: National Instruments. *Digital Waveform Timing*, Austin Texas

Los parámetros del pulso que permiten analizar el diagrama de ojo son los siguientes:

Sobretensión superior/inferior: Porcentaje de amplitud excedente del nivel de 1 (sobretensión superior) o 0 (sobretensión inferior).

Vamp: Amplitud del pulso.

Vmax: Amplitud máxima.

Tiempo de subida/bajada: Para obtenerlo, primero se ubican los niveles de cero y uno lógico, luego se obtiene el tiempo relacionado entre el 10% y 90% del valor máximo de amplitud del pulso (nivel de 1). El tiempo entre ambos rangos es el que se conoce como tiempo de subida. De la misma forma se obtiene el tiempo de bajada, en el extremo de descenso del pulso.

Intervalo unitario: tiempo entre dos transiciones de señal adyacentes.

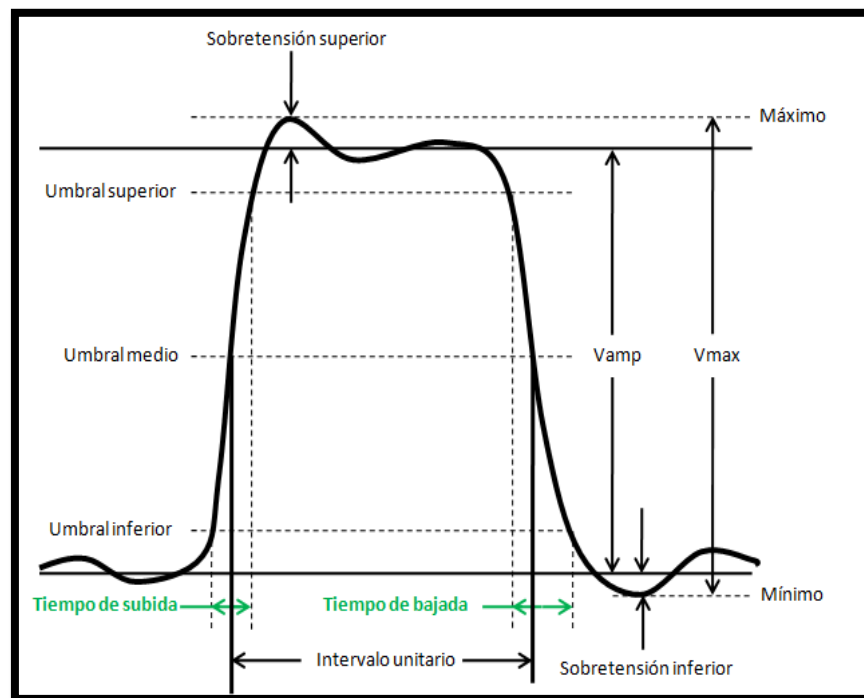


Figura 8: Parámetros del Pulso

Fuente: Optical fibers, cables and systems, ITU (2009)

2.2.4.1. Análisis de los Parámetros de Ojo

Son de dos tipos, por las características de la onda de pulso, y por la comparación de máscaras.

- **Por las características de la onda de pulso:**

- o **Nivel de 1 lógico:** Corresponde a la medición del valor promedio del nivel de un uno lógico. Esto se debe a que el diagrama de ojo utiliza métodos estadísticos en la construcción del patrón, es decir, se genera un histograma con los distintos valores del pulso y luego se considera una zona reducida del ancho del pulso, con lo que se logra obtener el promedio del nivel uno de dicho pulso.
- o **Nivel de 0 lógico:** Corresponde a la medida del valor medio del nivel cero lógico. Al igual que en el caso del nivel de uno las técnicas de medición del nivel de cero son las mismas.
- o **Cruce de amplitud:** se refiere al nivel de voltaje en el cual se produce la apertura del ojo y su posterior cierre.
- o **Cruce de tiempo:** se refiere al tiempo en el que se produce la apertura del ojo y su posterior cierre.
- o **Periodo de bit:** período entre la apertura y cierre del ojo. Se obtiene a partir del cruce de amplitud y el cruce de tiempo.

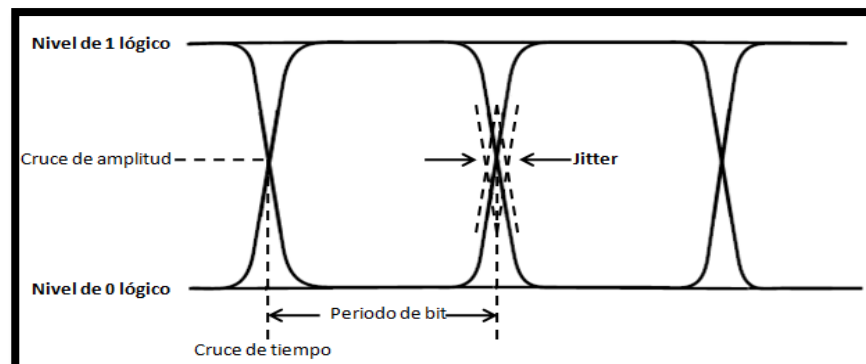


Figura 9: Característica de los parámetros de la onda de pulso
Fuente: Optical fibers, cables and systems, ITU (2009)

- **Por Comparación de Máscaras:**

Técnicamente, las máscaras preestablecidas definen regiones específicas en el diagrama de ojo, dentro de las cuales los pulsos u ondas no deben introducirse. Dichas máscaras son muy útiles, ya que se utilizan en el diseño de canales de transmisión, especificando por medio de ellas zonas no permitidas para las señales. Con ello se logra establecer un diseño óptimo de enlaces que cumplan ciertas características ya que, si la señal digital que se propaga por el canal se introduce en dichas regiones, se observan claramente problemas y errores en la transmisión

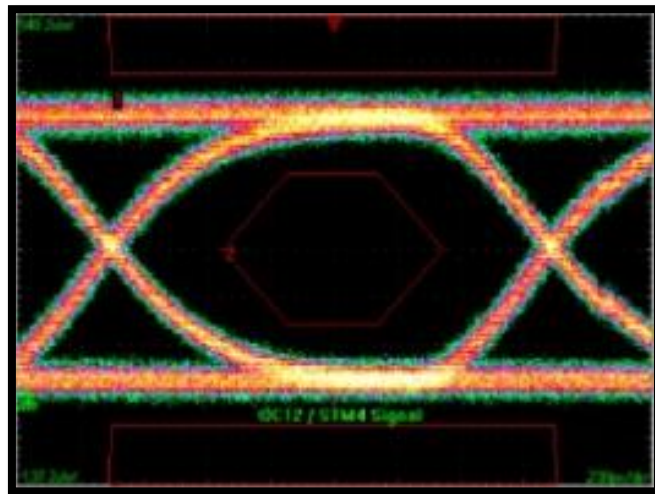


Figura 10: Máscara del diagrama de ojo para señales de transmisión óptica.

Fuente: Optical fibers, cables and systems, ITU (2010)

2.3. Definición de términos básicos

WDM. - multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing*) es una tecnología que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda, usando luz procedente de un láser o un led.

BER. – (*Bit Error Rate*) Tasa de errores de bits, BER se utiliza para cuantificar un canal que transporta datos contando la tasa de errores en una cadena de datos. Se utiliza en las telecomunicaciones, las redes y los sistemas de radio.

Multiplexación. – Es la combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión, permitiendo varias comunicaciones de forma simultánea, usando un multiplexor.

SNR. – (*Signal Noise Relation*) Relación señal-ruido, es una medida utilizada en la ciencia e ingeniería que compara el nivel de una deseada señal al nivel de fondo de ruido . Se define como la relación de potencia de la señal a la potencia de ruido, a menudo expresada en decibelios .

OSNR. – (*Optical Signal Noise Relation*) Las señales ópticas tienen una frecuencia portadora que es mucho mayor que la frecuencia de modulación (alrededor de 200 THz y más). De esta manera el ruido cubre un ancho de banda que es mucho más amplia que la propia señal. La influencia de la señal resultante se basa principalmente en el filtrado del ruido.

Dispersión Cromática. – Se refiere al retardo (deformación) espectral de un pulso óptico conforme se propaga por la fibra. La Fibra Óptica convencional tiene un coeficiente de dispersión positivo; Esto quiere decir que a mayores longitudes de ondas se tiene un mayor tiempo de tránsito a través de la fibra

Fibra Óptica. – Filamento de material dieléctrico, como el vidrio o los polímeros acrílicos, capaz de conducir y transmitir impulsos luminosos de uno a otro de sus extremos; permite la transmisión de

comunicaciones telefónicas, de televisión, etc., a gran velocidad y distancia, sin necesidad de utilizar señales eléctricas.

Ancho de Banda o Bandwidth. – Se conoce como la capacidad para transportar información en telecomunicaciones.

Hertz. – Unidad física usada para medir la frecuencia de ondas y vibraciones de tipo electromagnética.

Modulación. – Es una técnica que se usa para transportar información sobre una onda portadora.

Estimación. – Es el proceso de encontrar una aproximación acerca de parámetros u magnitudes.

Distorsión. – Es la deformación que sufre una señal tras su paso por un sistema.

CAPÍTULO III: MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1 Población y Muestra

La población está constituida por todas las observaciones de parámetros de BER y OSNR que puedan realizarse para cada variación de longitud entre amplificadores y el número de amplificadores utilizados.

No hay un número determinado de observaciones que puedan realizarse por ser una condición no determinística. Por lo cual y teniendo en cuenta las limitaciones de la herramienta de simulación, se van a realizar 7 observaciones de 2 parámetros en un enlace WDM con amplificadores al variar su distancia de separación 8 veces, observando el comportamiento de 3 longitudes de onda.

Tomando en cuenta todas estas condiciones, se tendrá un total de 336 observaciones, lo cual constituye la muestra a emplear en la presente investigación.

3.1.2. Unidad de Análisis

Se busca hacer un análisis de los parámetros de BER y OSNR en un enlace óptico con la variación de la longitud de onda.

3.2. Método

3.2.1 Tipo de Investigación

El tipo de investigación propuesto en el presente proyecto es de tipo descriptiva. Se busca caracterizar los parámetros BER y OSNR en un sistema óptico WDM con respecto a diferentes números y distancia de separación de amplificadores EDFA.

3.2.2. Diseño de Investigación

El diseño de la investigación se caracteriza por ser una investigación documental. Se trabaja con los reportes de parámetros de BER y OSNR

obtenidos de la simulación de un sistema óptico WDM al variar la cantidad de amplificadores EDFA en el enlace.

Etapas:

1. Recopilación de documentación e información sobre interpretaciones de diagrama de ojo y parámetros de BER y OSNR.
2. Simulación de un sistema óptico de 3 longitudes de onda WDM mediante el simulador Optisystem y la variación de la distancia de separación y el número de amplificadores EDFA.
3. Recopilación de los reportes de simulación respecto de los parámetros obtenidos de BER y OSNR.
4. Elaboración de curvas de la relación de BER y OSNR respecto del número de amplificadores EDFA en el enlace con distinta distancia de separación.

3.2.3. Variables de estudio y Operacionalización

a. Variables Independientes

- a.1.** Número de amplificadores EDFA.
- a.2.** Distancia de separación entre amplificadores EDFA.

b. Variables Dependientes

- b.1.** Separación señal a ruido óptico en un sistema WDM simulado.
- b.2.** Tasa de bits errados en un sistema WDM simulado.

c. Definición operacional de las Variables de estudio.

- c.1. Variables Independientes.**

Tabla 3.2.3.1 Número de amplificadores EDFA

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDADES MEDIDA
Número de amplificadores EDFA.	Se refiere a la cantidad de amplificadores empleados en un enlace de fibra óptica que se utiliza como medio de transmisión para un enlace WDM	Se realizará la simulación de diferentes longitudes de fibra óptica empleando una cantidad variable de amplificadores en el escenario de simulación.	Amplificadores dopados de erbio.	Reporte simulación	Número de amplificadores

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2.3.2 Distancia de separación entre amplificadores EDFA

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDADES MEDIDA
Distancia de separación entre amplificadores EDFA.	Se refiere a la distancia de separación entre amplificadores empleados en un enlace de fibra óptica que se utiliza como medio de transmisión para un enlace WDM	Se realizará la simulación de un enlace WDM con amplificadores EDFAs equidistantes, variando el valor de su distancia de separación	Valor de distancia de separación entre amplificadores.	Reporte simulación	Km

Fuente: Elaboración Propia

c.2. Variables Dependientes.

Tabla 3.2.3.3 Separación señal a ruido en un sistema WDM simulado (OSNR)

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDADES MEDIDA
Separación Señal a Ruido Óptica en un sistema WDM simulado	Es la cuantificación de la separación entre la potencia de la señal óptica y la potencia de ruido óptico estimada en un sistema WDM simulado al variar el número de amplificadores y su distancia de separación	Diferencia entre los niveles de señal óptica y niveles de ruido óptico	OSNR	Reportes de simulación	Decibelios (dB)

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2.3.4 Tasa de bits Errados en un sistema Óptico WDM simulado (BER).

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	UNIDADES MEDIDA
Tasa de Bits Errados en un sistema óptico WDM simulado	Es la cuantificación del número de bits perdidos respecto al número de bits transmitidos, estimados en un sistema óptico WDM simulado al variar el número de amplificadores y su distancia de separación	Relación entre el número de bits errados respecto del número de bits transmitidos.	BER	Reportes de simulación	Adimensional

Fuente: Elaboración Propia

3.2.4. Instrumentos de recolección de Datos

Herramienta de simulación

La herramienta de simulación que se escogió para el desarrollo de esta investigación fue **Optisystem 7.0 de Optiwave**. La cual permite realizar simulaciones de sistemas ópticos, entre ellos el sistema WDM. Se tuvo alcance a esta herramienta en su versión Demo, la cual permitió trabajar dentro de lo requerido para esta investigación.

Esta herramienta ofrece reportes gráficos que facilitan el análisis de los parámetros tales como BER y OSNR mediante los diagramas de ojo y simuladores de instrumentos virtuales como osciloscopios, analizadores de espectro óptico y eléctrico. Aunque su principal instrumento virtual es un estimador de la tasa de error de bit (BER), parámetro de calidad básico para los sistemas de transmisión digital. (Poveda, G.; Carrera, C.; 2015).

Reportes de la herramienta Optisystem 7.0

OSNR

La relación señal ruido óptica es la medida de la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido de un enlace óptico.

Esta medida es importante porque sugiere un grado de deterioro cuando la señal óptica es transportada por un sistema de transmisión óptica que incluye amplificadores ópticos.

$$OSNR = 10dB \cdot \text{Log}_{10}\left(\frac{S}{N}\right)$$

Donde, S representa la potencia de la señal óptica y N es la potencia del ruido óptico. Ambos valores son lineales.

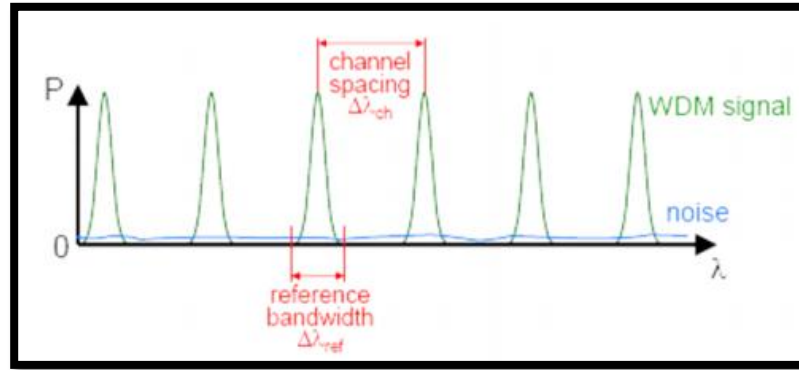


Figura 3.1. Ejemplo de la relación señal ruido óptico.

Sin embargo para el desarrollo de esta investigación, el valor del OSNR fue calculado a partir del diagrama de ojo. Tomando como referencia el punto central del patrón del ojo hasta el punto mínimo de la probabilidad 1s. Como se observa en la **Figura 3.2**. La unidad de medida de esta relación es en unidades de amplitud (U.A.)

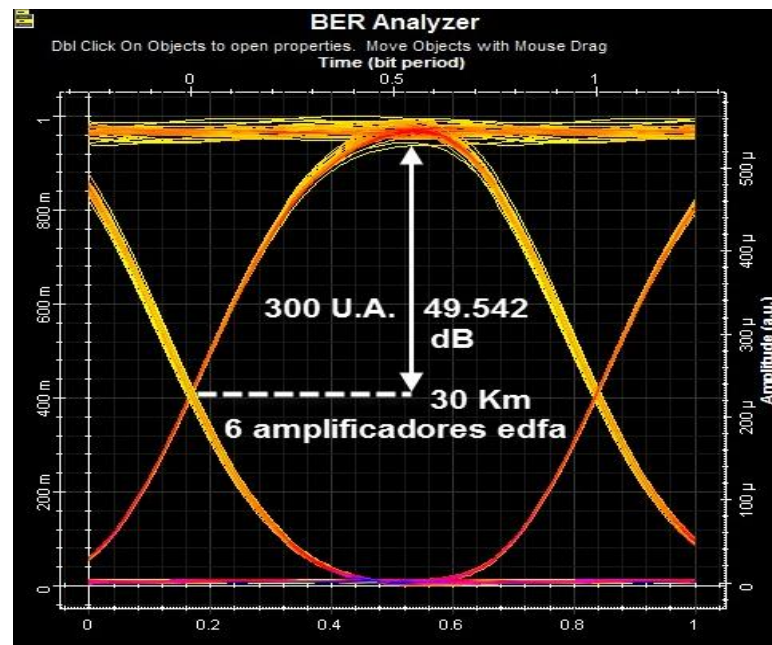


Figura 3.2. Calculo de medida del OSNR

Fuente: Elaboración propia

BER

Este parámetro representa el número esperado de bits que se han transmitido erróneamente. Actualmente los sistemas ópticos trabajan con una tasa de error extremadamente baja, menor de 10^{-9} es decir que, por cada mil millones de bits transmitidos solo un bit es erróneo.

Existen muchos parámetros externos influyen como un ruido aleatorio, que provoca desalineaciones, fluctuación de fase y otras perturbaciones que dan lugar a bits erróneos, cuya velocidad se conoce como tasa de errores de bits.

La definición de la tasa de error de bits se puede traducir en una fórmula simple:

Tasa de error de bit es igual al número de errores de bit dividido por el número total de bits enviado.

Esta relación no tiene manera directa en la cual se pueda analizar, por lo cual hacemos uso de un instrumento en nuestra herramienta de simulación llamado BER Analyzer, el cual en su función de BER Pattern nos muestra el comportamiento del BER en el sistema, el cual está señalado de celeste en la **Figura 3.3**

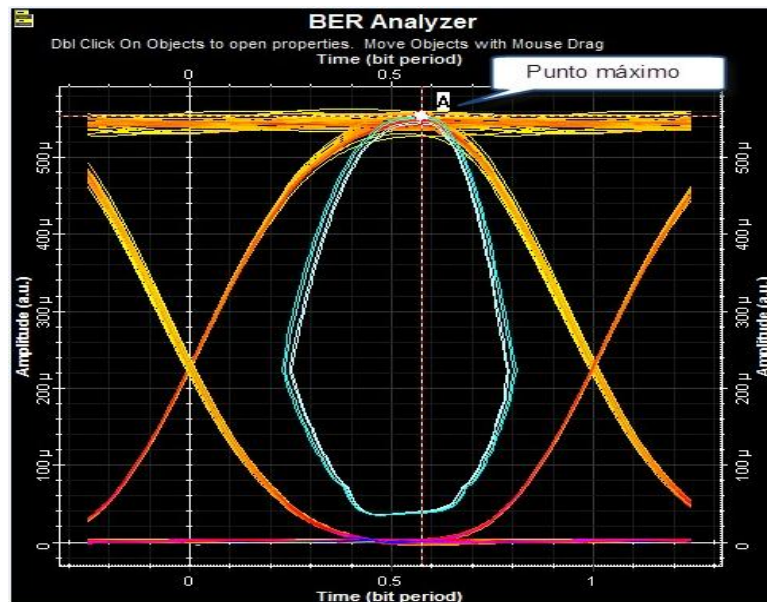


Figura 3.3. Comportamiento del parámetro BER

Fuente: Elaboración propia

Del cual tomamos el punto más alto en el que el BER tomaría su valor máximo, tal y como se ve en la **Figura 3.4.**, punto en el cual nos centraremos para considerar la mayor tasa de error de bit posible en el sistema.

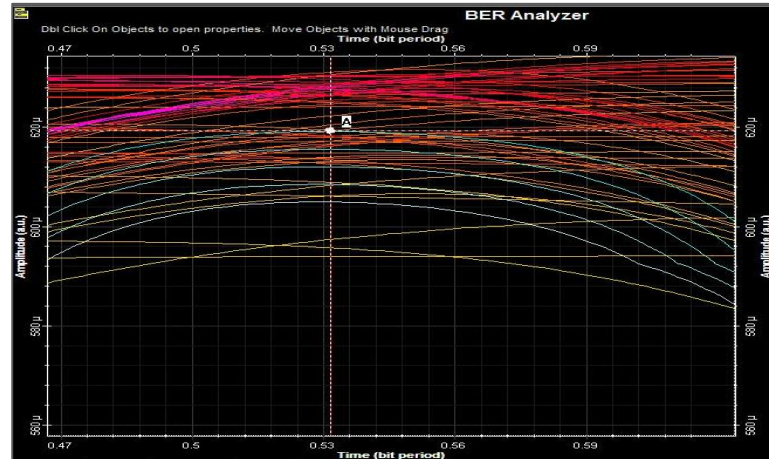


Figura 3.4. Punto del BER máximo.

Fuente: Elaboración propia

3.2.5. Técnicas de procesamiento de datos

Para el procesamiento de los datos se tomó como base un enlace modelo, basado en los antecedentes mencionados en esta investigación y usando lo necesario para poder demostrar los parámetros requeridos.

El esquema de simulación seleccionado, se basó en el diagrama mostrado en la **Figura 3.5.** Donde se representa un escenario de enlace WDM con amplificadores intermedios.

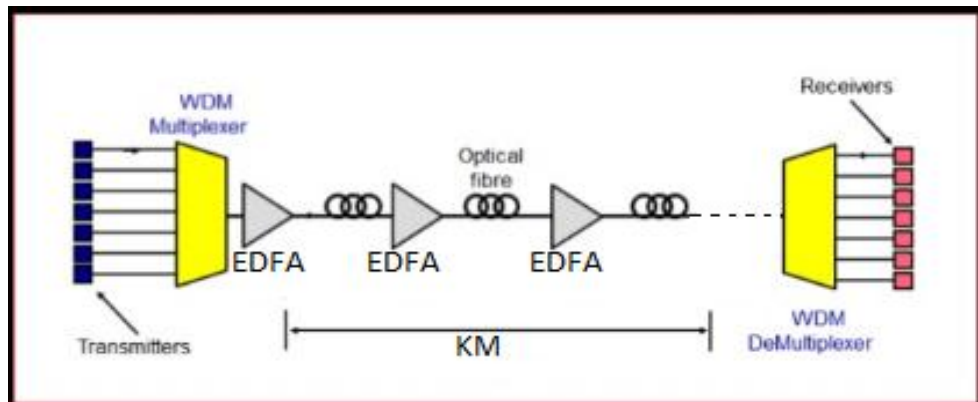


Figura 3.5. Características a nivel físico de WDM

Fuente: Elaboración Propia

Basándose en el esquema anterior, se implementó el esquema en la herramienta de simulación, en la cual se definieron los instrumentos a usar para la recolección de los parámetros de interés.

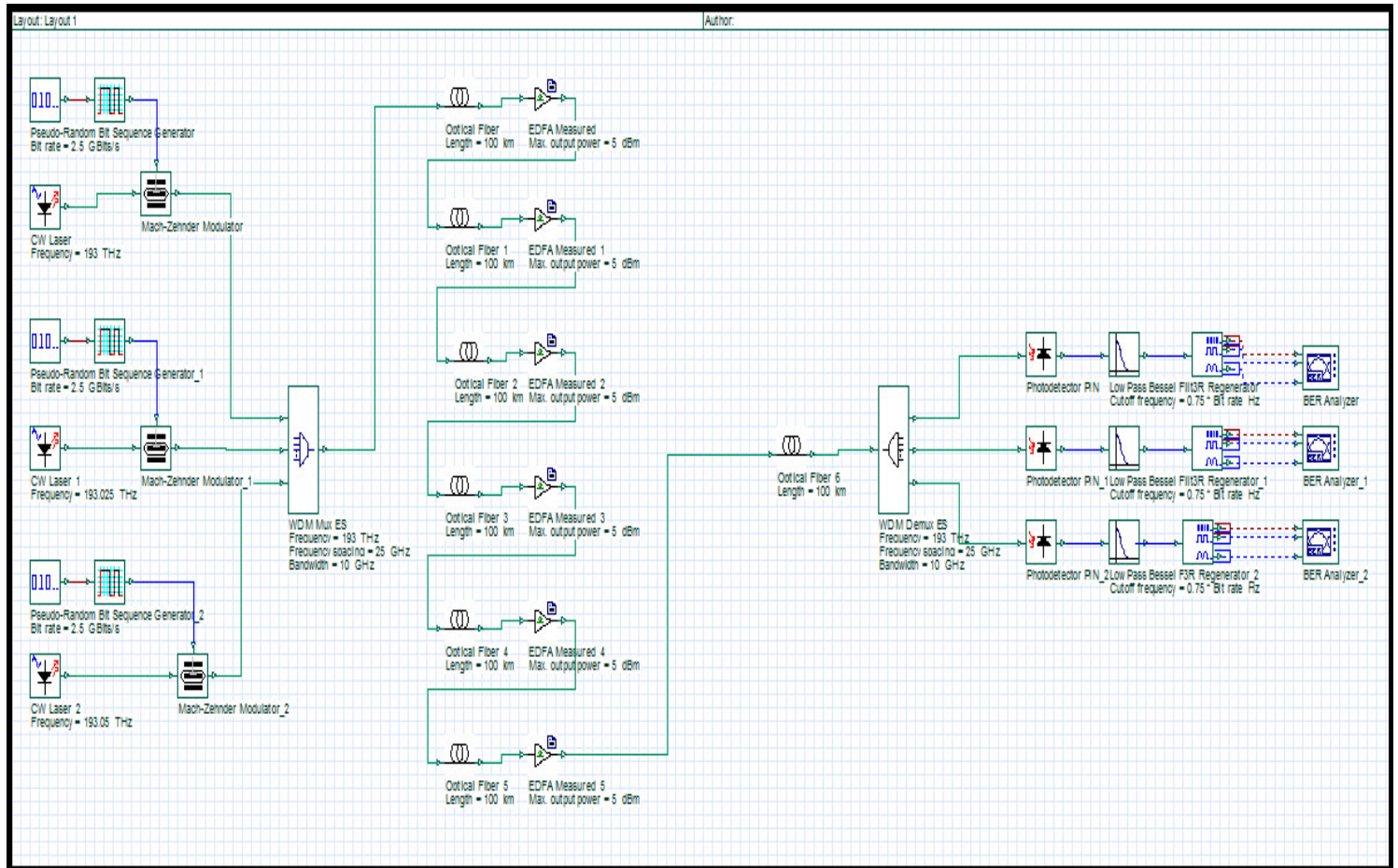


Figura 3.6. Diseño completo de la simulación

Fuente: Elaboración propia

El diseño completo de esta investigación consta de 5 etapas las cuales se deberán configurar en el simulador para lograr analizar los parámetros propuestos.

En la primera etapa, se tiene la entrada de las señales a través de 3 canales. Estas entradas estarán designadas cada una a una longitud de onda específica (193,00 THz, 193,025 THz y 193,05 THz). Mediante el software,

se hizo una interpretación de la señal de entrada en los canales, que se podría comparar con las señales recibidas de los módulos ADM SDH, que podrían ser provenientes de diferentes troncales o nodos, por ejemplo, aquellas que transmiten internet, telefonía y cable. Entonces esta parte constituye la etapa de la generación de la señal simulando dicha señal a través de un láser, pulsos ópticos, etc.

En la segunda etapa, de la multiplexación es donde se unificaron las 3 señales de entrada en una sola para poder ser enviadas a través de un medio óptico llamado fibra óptica.

En la tercera etapa, la fibra óptica es importante ya que se evaluará 8 diferentes longitudes de enlaces, desde los 30 km hasta los 100 km, separados por amplificadores EDFA, los cuales serán agregados de uno en uno desde no utilizar ningún amplificador hasta completar los 6 en todo el sistema. Esto con la finalidad de poder analizar los parámetros de BER y OSNR.

En la cuarta etapa, se hará uso del demultiplexor, necesario para poder separar las 3 longitudes de onda que vinieron juntas a través de la fibra óptica y así poder analizarlas cada una.

En la quinta etapa y final, se hace uso de un componente de la librería llamado BER Analyzer, que es aquella que podrá analizar cada una de las 3 señales demultiplexadas mediante los diagramas de ojo respectivos para cada uno, y así poder analizar sus parámetros.

- **Detalle de componentes empleados en la herramienta de simulación.**

1. Generación de señal

Para generar las señales se hace uso de 4 componentes, los cuales se pueden observar en la Figura 3.7.

- 1 generador de secuencias óptico
- 1 generador de pulsos ópticos
- 1 generador laser
- 1 modulador mach-zehnder

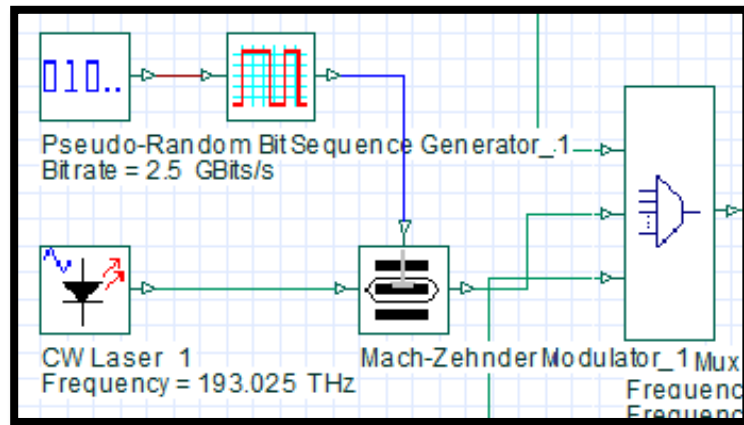


Figura 3.7. Fase de generación

Fuente: Elaboración Propia

2. Multiplexación/ Demultiplexación

Para que las señales se puedan multiplexar y demultiplexar se hace uso de un sistema que permite que los 3 canales puedan transmitir y recibir señales por medio de una sola fibra óptica.

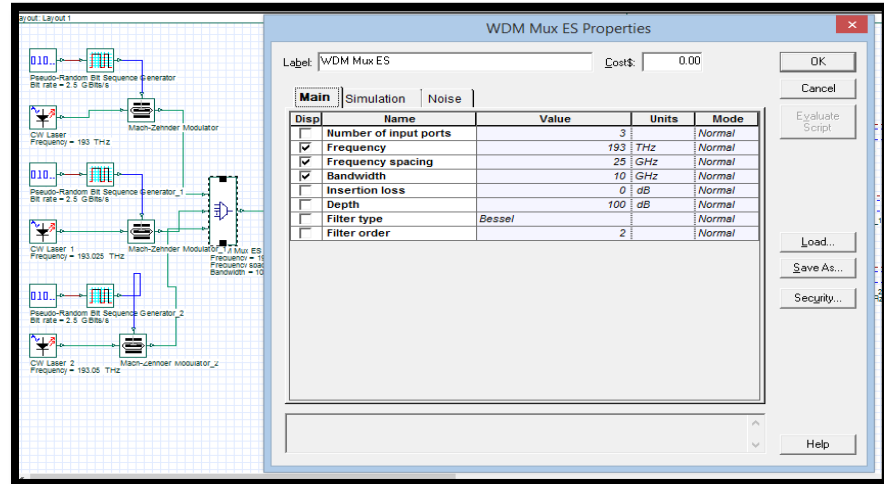


Figura 3.8. Sistema de Multiplexación

Fuente: Elaboración propia

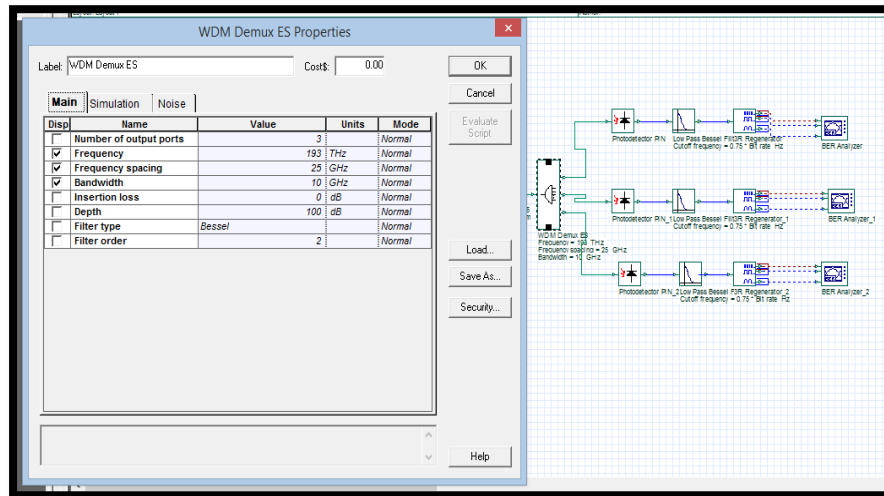


Figura 3.9. Configuración del sistema de Demultiplexación

Fuente: Elaboración propia

3. Fibra Óptica Monomodo

Se eligió la fibra monomodo porque este tipo de fibra es capaz propagar una alta tasa de datos y también porque tiene una atenuación más baja que el multimodo. Se utiliza frecuentemente para aplicaciones de transmisión de datos a alta velocidad o para largas distancias. En esta etapa se asignaron los parámetros principales para la fibra óptica y los de Dispersión, tales como se puede observar en las **Fig. 3.10** y **Fig. 3.11**

Optical Fiber_5 Properties

Label: Optical Fiber_5 Cost\$: 0.00

OK Cancel Evaluate Script

Main Disp... PMD Nonl... Num... Gr... Simu... Noise Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	User defined reference w	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Reference wavelength	1550	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	60	km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation	0.35	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelengt	Attenuation.dat		Normal

Load... Save As... Security... Help

Figura 3.10. Parámetros principales de conexión fibra monomodo

Fuente: Elaboración propia

Optical Fiber_6 Properties

Label: Optical Fiber_6 Cost\$: 0.00

OK Cancel Evaluate Script

Main Disp... PMD Nonl... Num... Gr... Simu... Noise Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Group velocity dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Third-order dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Frequency domain param	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion	4	ps/nm/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion slope	0.09	ps/nm ² /k	Normal
<input type="checkbox"/>	Beta 2	-20	ps ² /km	Normal
<input type="checkbox"/>	Beta 3	0	ps ³ /km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion file format	Dispersion vs. wavelength		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion file name	Dispersion.dat		Normal

Load... Save As... Security... Help

Figura 3.11. Parámetros de Dispersión de conexión fibra monomodo

Fuente: Elaboración propia

Para la realización de la investigación, se optó por usar parámetros que se asemejen a lo real para una fibra monomodo, tal y como se puede ver en la hoja técnica en la **fig. 3.12**.

Características de la fibra. G.652.B			Ancho de banda de transmisión
	Longitud de onda	1310 nm	
	Rango	8,6 - 9,5 μ m	
Diámetro de campo modal	Tolerancia	$\pm 0,6 \mu$ m	
Pendiente de dispersión			
Cromática de 1300 - 1324 nm	S0max	0,092 ps/nm2.km	
Características del cable			1310 nm, 1550 y 1625 nm (Bandas O, C y L)
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260 nm	
	Max a 1310 nm	0,40 dB/Km	
	Max a 1550 nm	0,35 dB/Km	
	Max a 1625 nm	0,40 dB/Km	
Coefficiente de atenuación	M	20 cables	
	Q	0,01%	
Coefficiente de PMD	Max PMDq	0,20 ps/ \sqrt km	
Características de la fibra. G.652.D			Ancho de banda de transmisión
	Longitud de onda	1310 nm	
	Rango	8,6 - 9,5 μ m	
Diámetro de campo modal	Tolerancia	$\pm 0,6 \mu$ m	
Pendiente de dispersión			
Cromática de 1300 - 1324 nm	S0max	0,092 ps/nm2.km	Amplia cobertura: bandas O a L. Similar a G,652,B pero permite la transmisión en ancho de banda extendido de 1360 nm a 1530 nm.
Características del cable			Adecuada para sistemas CWDM
Longitud de onda de corte del cable	Máximo	1260 nm	
	1310 a 1625 nm	0,40 dB/Km	
	1383 \pm 3 nm	*	
Coefficiente de atenuación	Máximo	1550 nm 0,30 dB/Km	
	M	20 cables	
	Q	0,01%	
Coefficiente de PMD	Max PMDq	0,20 ps/ \sqrt km	

Figura 3.12. Hoja Técnica de Fibra monomodo subcategoría G.652B.

Fuente: Juan Diaz. Data sheet single mode Optical Fiber G.652B

4.- Transducción de señal

Para la transducción de la señal recibida, tal y como se muestra en la **Figura 3.13.**, se hace uso de:

- Foto detector
- Filtro de Bessel (pasa bajos)
- 3R Regenerador

Éste último ayudará a analizar la señal recibida enlazándose a un componente de la librería llamado **BER ANALIZER**, el cual se encargará de analizar la señal mediante los diagramas de ojo respectivos de cada uno de los 3 canales y en donde se determinará los valores de los parámetros de BER.

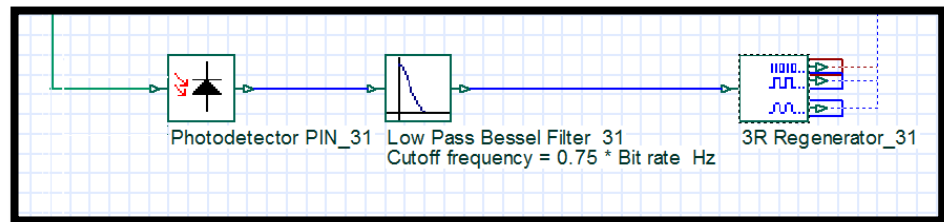


Figura 3.13. Etapa de transducción de señal

Fuente: Elaboración Propia

En quinta y última etapa del enlace del 3R Regenerator y BER Analyzer, se utilizan 3 tipos de conexiones: 2 para las señales transmitidas que son la señal binaria y la señal eléctrica, y 1 para la señal recibida que en este caso es la señal eléctrica. En conjunto estas conexiones, mostradas en la **Figura 3.14.**, permitirán el funcionamiento del BER Analyzer para la muestra del diagrama o patrón de ojo.

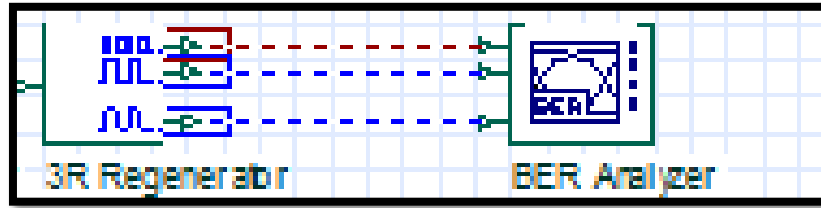


Figura 3.14. Enlace 3R Regenerator y BER Analyzer

Fuente: Elaboración Propia

Especificando así los componentes usados, se puede observar que los valores utilizados en la simulación fueron basados mayormente de los antecedentes y en los valores reales encontrados en el datasheet del tipo de fibra óptica monomodo utilizado.

3.2.6. Técnicas de análisis de datos

Tablas de tendencia de parámetros OSNR y BER

Una tabla de tendencia hace referencia al comportamiento que mostrará un parámetro con respecto o a través de un intervalo de una magnitud (tiempo, longitud, etc.). Esto nos permite obtener relaciones y conclusiones respecto a las magnitudes evaluadas, determinando así el comportamiento que sigue un patrón respecto a sus magnitudes.

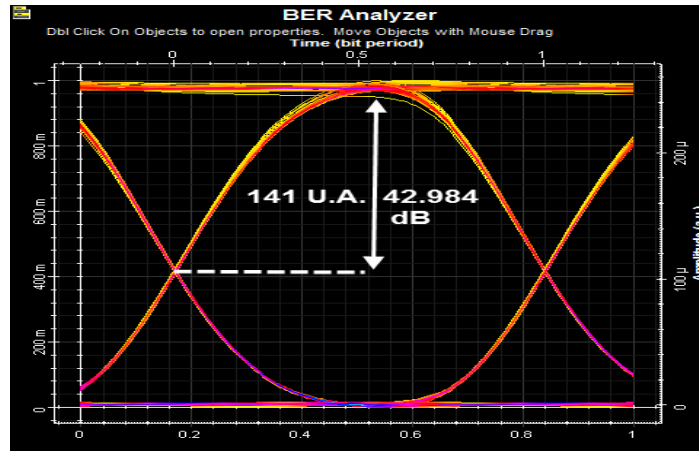
Estas tablas de tendencia se pueden elaborar en diversos programas donde se pueda trabajar sobre parámetro estadísticos, por lo cual se hace uso de la herramienta Excel. Dicha herramienta permitirá agrupar los datos anteriormente tomados. Por ejemplo en el siguiente cuadro de la **Tabla 3.2.6.1**, se muestra la tabla de datos tomada para los diferentes parámetros con la longitud de enlace igual a 30km hasta 100km.

Tabla 3.2.6.1 Tabla de parámetros OSNR (dB)

Distancia	30km			40km			50km			60km			70km			80km			90km			100km		
Puntos	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050
P1	42.984	42.671	42.984	38.890	38.790	38.890	34.964	34.964	34.964	31.932	30.931	30.955	26.600	26.689	26.403	26.403	22.345	22.490	18.276	17.908	17.616	11.364	12.465	12.465
P2	49.513	49.066	49.513	45.801	45.666	45.889	41.438	40.668	41.511	37.616	37.025	37.501	33.625	33.497	33.927	33.927	29.066	29.686	22.542	21.727	22.076	13.442	12.869	12.041
P3	49.966	49.513	49.827	45.008	44.402	45.201	40.424	39.554	40.749	37.385	37.147	37.662	28.299	33.198	33.368	33.368	28.199	28.755	23.694	23.405	23.750	13.064	12.256	10.881
P4	49.855	49.714	49.714	44.609	43.346	45.105	39.554	38.690	40.257	37.195	37.290	37.338	32.710	32.730	33.006	33.006	27.959	28.498	22.984	22.984	22.076	10.370	12.256	13.442
P5	49.542	49.005	49.367	44.506	43.694	44.609	38.690	37.842	39.370	37.074	36.663	37.122	32.710	32.319	32.829	32.829	27.421	27.959	22.076	22.212	22.007	13.064	11.709	12.669
P6	49.629	49.629	49.743	44.861	44.137	44.959	39.370	37.616	39.370	37.159	36.391	37.147	32.790	32.256	32.588	32.588	26.568	27.347	20.000	20.086	20.906	12.967	12.967	13.160
P7	49.542	49.629	49.714	45.201	44.660	44.959	39.463	37.616	39.554	36.599	35.987	36.688	32.319	32.085	32.361	32.361	26.568	27.082	20.257	18.690	20.000	12.465	11.821	12.869

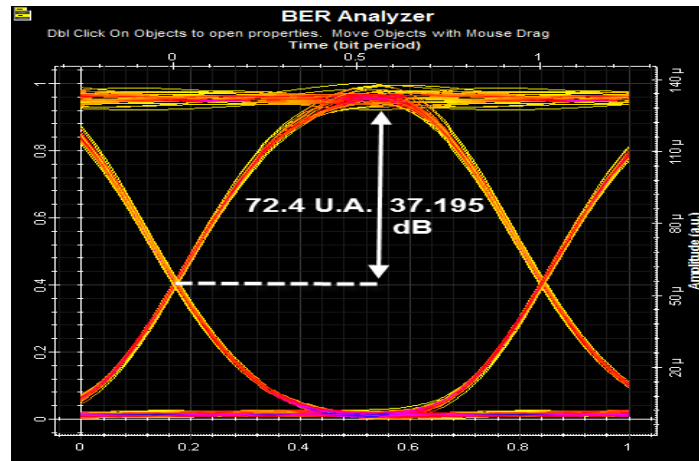
La tabla 3.2.6.1. Es la resultante de obtener los valores por cada punto medido, es decir después de cada amplificador. Cabe destacar que el punto de muestra 1, es tomado sin amplificador de por medio, y que a partir del punto de muestra 2 se tiene un amplificador de por medio. De esta forma en el punto de muestra 3 se tendrán 2 amplificadores y así sucesivamente hasta llegar al punto de muestra 7 donde se tendrán 6 amplificadores de por medio. La distancia es igual a la longitud de la fibra. Al comparar estas medidas podremos obtener una tendencia de cada parámetro a través de las diferentes longitudes de enlace y número de amplificadores con respecto a las longitudes de onda consideradas.

En los siguientes gráficos se muestran las tendencias de cada parámetro estudiado y su respectivo análisis entre la máxima y mínima distancia usada. En las siguientes **figuras 3.15, figura 3.16 y Figura 3.17**. Se presenta las diferencias entre el parámetro BER a las distancias 30km sin amplificadores, distancias 60km con 3 Amplificadores y distancias de 100km con 6 Amplificadores.



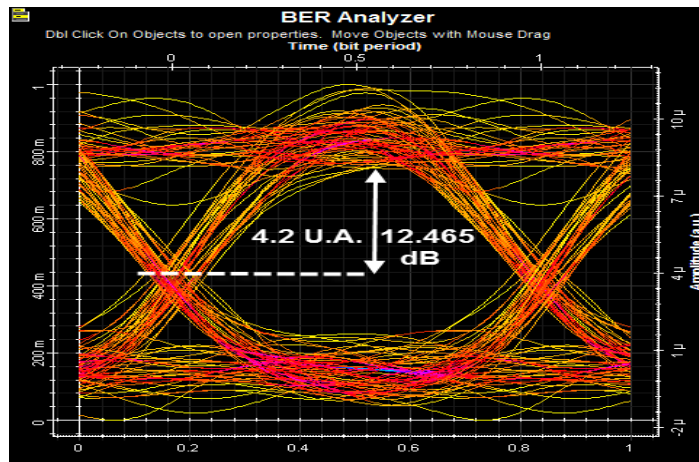
Figuras 3.15. OSNR a 30 Km sin amplificadores (42.98 dB)

Fuente: Elaboración propia



Figuras 3.16. OSNR con 3 amplificadores separados cada uno 60 Km (37.195 dB)

Fuente: Elaboración propia



Figuras 3.17. OSNR con 6 Amplificadores separados c/u 100 Km (12.465 dB)

Fuente: Elaboración propia

En la **figura 3.18** Se presenta la curva final de tendencia del parámetro OSNR (dB)

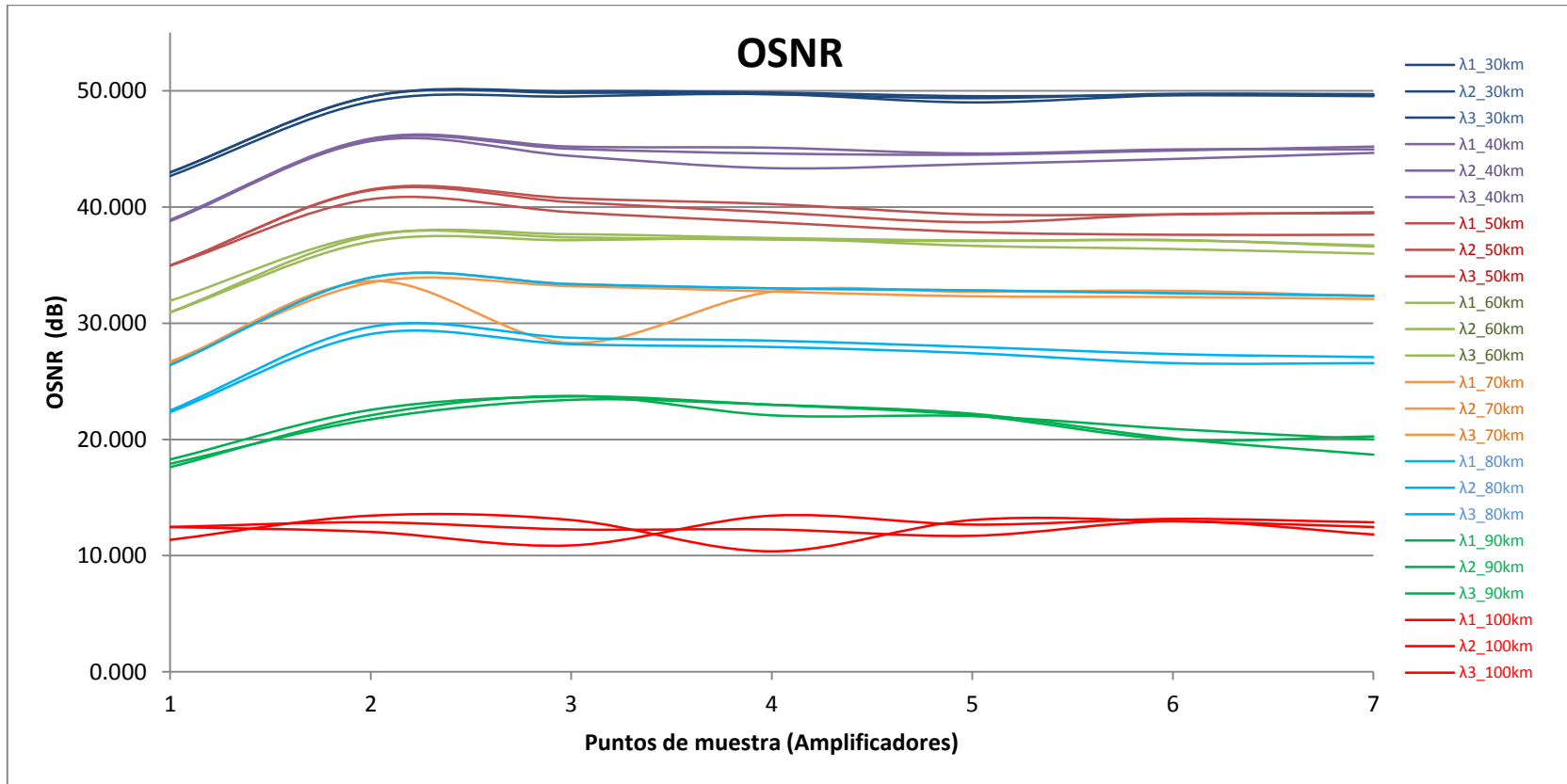


Figura 3.18. Curva de Tendencia Parámetro OSNR en dB

Fuente: Elaboración propia

En la **figura 3.19** Se presenta la curva final de tendencia del parámetro OSNR (UA)

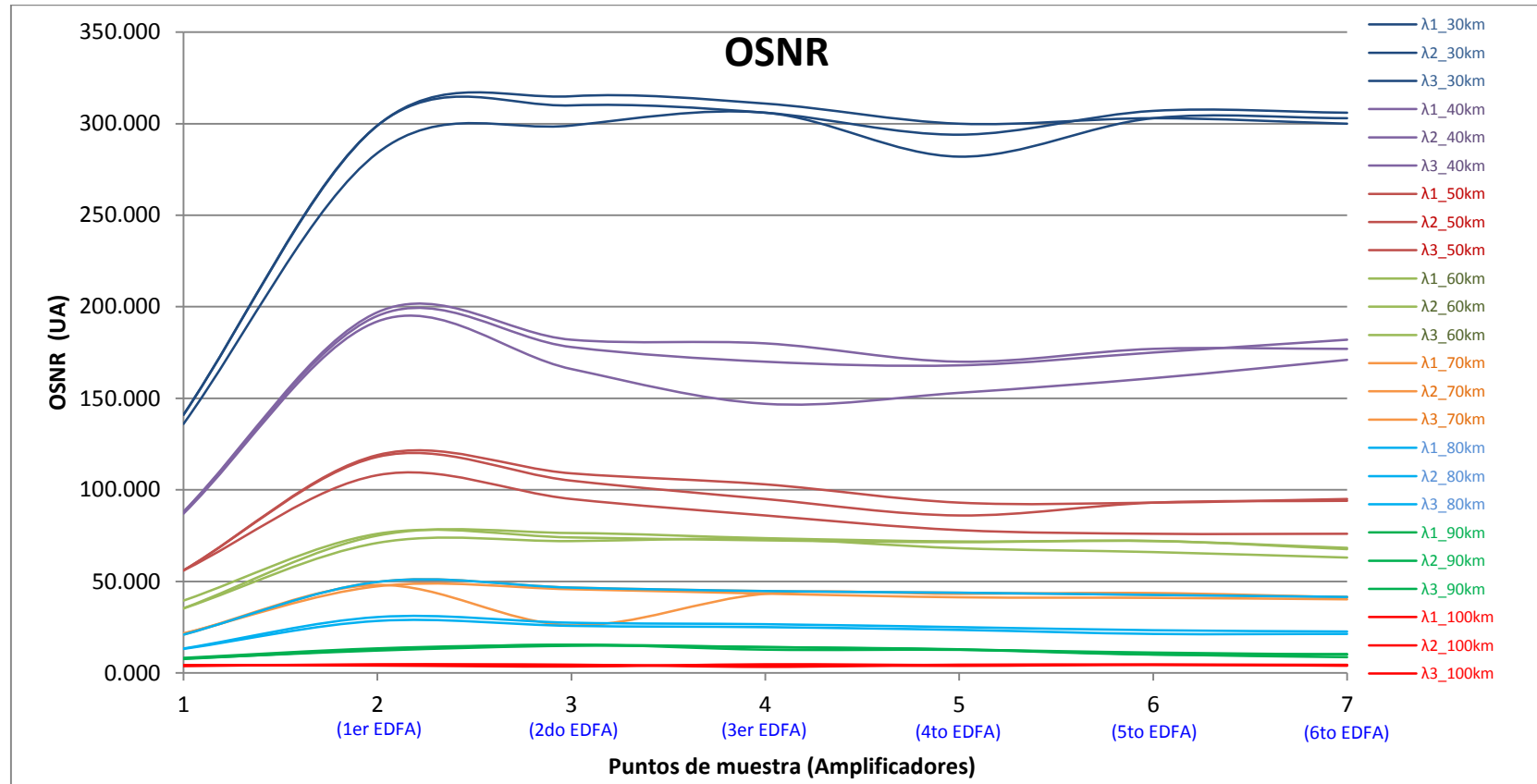


Figura 3.19. Curva de Tendencia Parámetro OSNR en UA

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2.6.2 Tabla de parámetros BER (AU)

Distancia	30km			40km			50km			60km			70km			80km			90km			100km		
Puntos	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050
P1	152.000	145.000	151.000	95.000	95.000	96.000	65.000	60.000	61.000	37.700	37.300	37.700	22.080	22.400	22.700	12.700	12.900	13.220	6.800	7.060	6.700	6.700	3.200	3.400
P2	312.000	264.000	313.000	211.000	197.000	211.000	121.000	101.000	122.000	77.000	62.500	77.000	52.500	49.600	49.700	31.100	26.400	31.300	13.300	10.900	12.800	12.800	2.900	3.800
P3	355.000	333.000	347.000	193.000	151.000	191.000	102.000	64.000	102.000	78.000	75.000	80.500	48.500	48.200	49.400	26.600	23.200	28.000	14.800	13.600	16.000	16.000	2.100	3.200
P4	345.000	331.000	346.000	174.000	108.000	180.000	91.000	31.000	90.000	46.500	79.000	77.800	46.400	45.900	47.100	26.500	24.400	27.300	13.700	12.400	12.500	12.500	2.500	4.000
P5	317.000	264.000	307.000	167.000	105.000	165.000	82.000	15.000	81.000	72.600	67.600	75.300	45.600	43.300	45.600	25.500	22.400	26.000	11.900	9.600	11.500	11.500	2.700	3.500
P6	329.000	330.000	331.000	173.000	123.000	172.000	74.000	15.000	76.000	69.800	68.400	71.000	42.400	40.500	41.600	23.900	22.100	23.000	8.900	6.700	10.400	10.400	2.600	3.800
P7	324.000	322.000	329.000	182.000	140.000	177.000	75.000	15.000	72.000	70.000	65.400	69.200	43.500	40.700	42.800	22.000	20.000	23.600	8.700	3.900	8.300	2.700	1.800	3.600

La tabla 3.2.6.2. Es la resultante de obtener los valores por cada punto medido, es decir después de cada amplificador. Cabe destacar que el punto de muestra 1, es tomado sin amplificador de por medio, y que a partir del punto de muestra 2 se tiene un amplificador de por medio. De esta forma en el punto de muestra 3 se tendrán 2 amplificadores y así sucesivamente hasta llegar al punto de muestra 7 donde se tendrán 6 amplificadores de por medio. La distancia es igual a la longitud de la fibra. Al comparar estas medidas podremos obtener una tendencia de cada parámetro a través de las diferentes longitudes de enlace y número de amplificadores con respecto a las longitudes de onda consideradas.

En los siguientes gráficos se muestran las tendencias de cada parámetro estudiado y su respectivo análisis entre la máxima y mínima distancia usada. En las siguientes **figuras 3.20, figura 3.21 y Figura 3.22**. Se presenta las diferencias entre el parámetro BER a las distancias 30km sin amplificadores, distancias 60km con 3 Amplificadores y distancias de 100km con 6 Amplificadores.

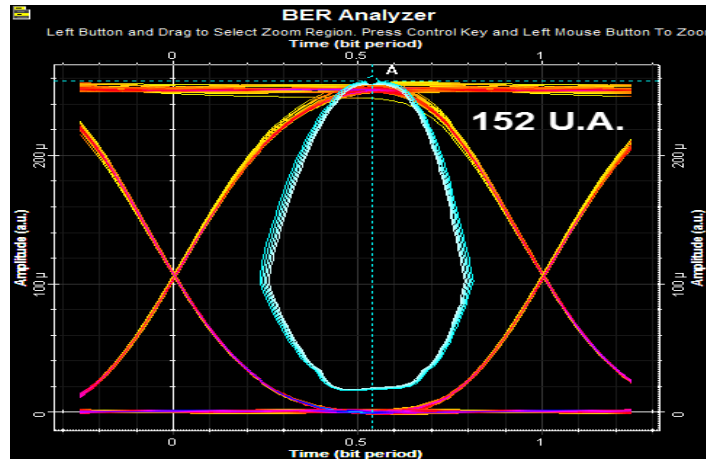


Figura 3.20. Parámetro BER a 30 km a 193 THz sin Amplificadores (152 U.A.)
Fuente: Elaboración Propia

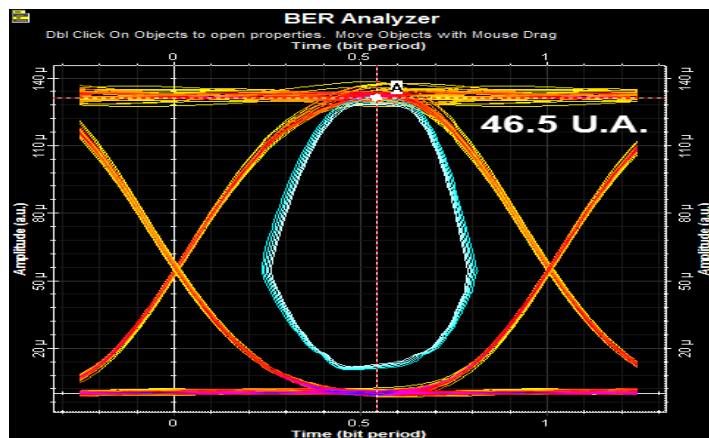


Figura 3.21. Parámetro BER a 60 km a 193 THz con 3 Amplificadores (46.5 U.A.)
Fuente: Elaboración Propia

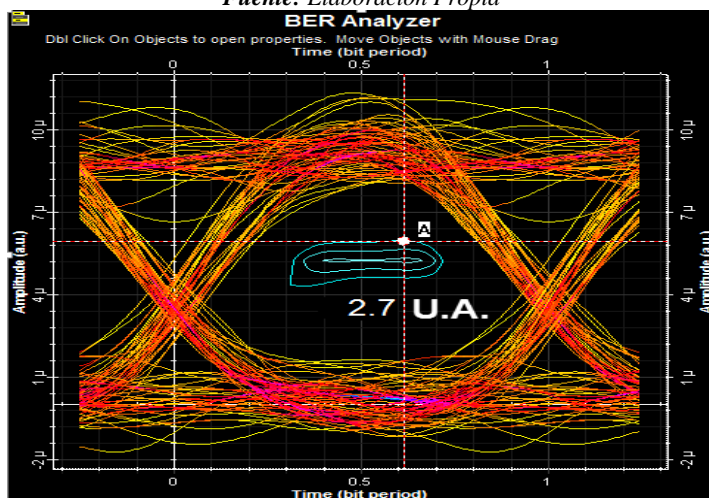


Figura 3.22. Parámetro BER a 100 km a 193 THz con 6 Amplificadores (2.7 U.A.)
Fuente: Elaboración Propia

En la **Figura 3.23** Se presenta la curva final de tendencia del parámetro BER

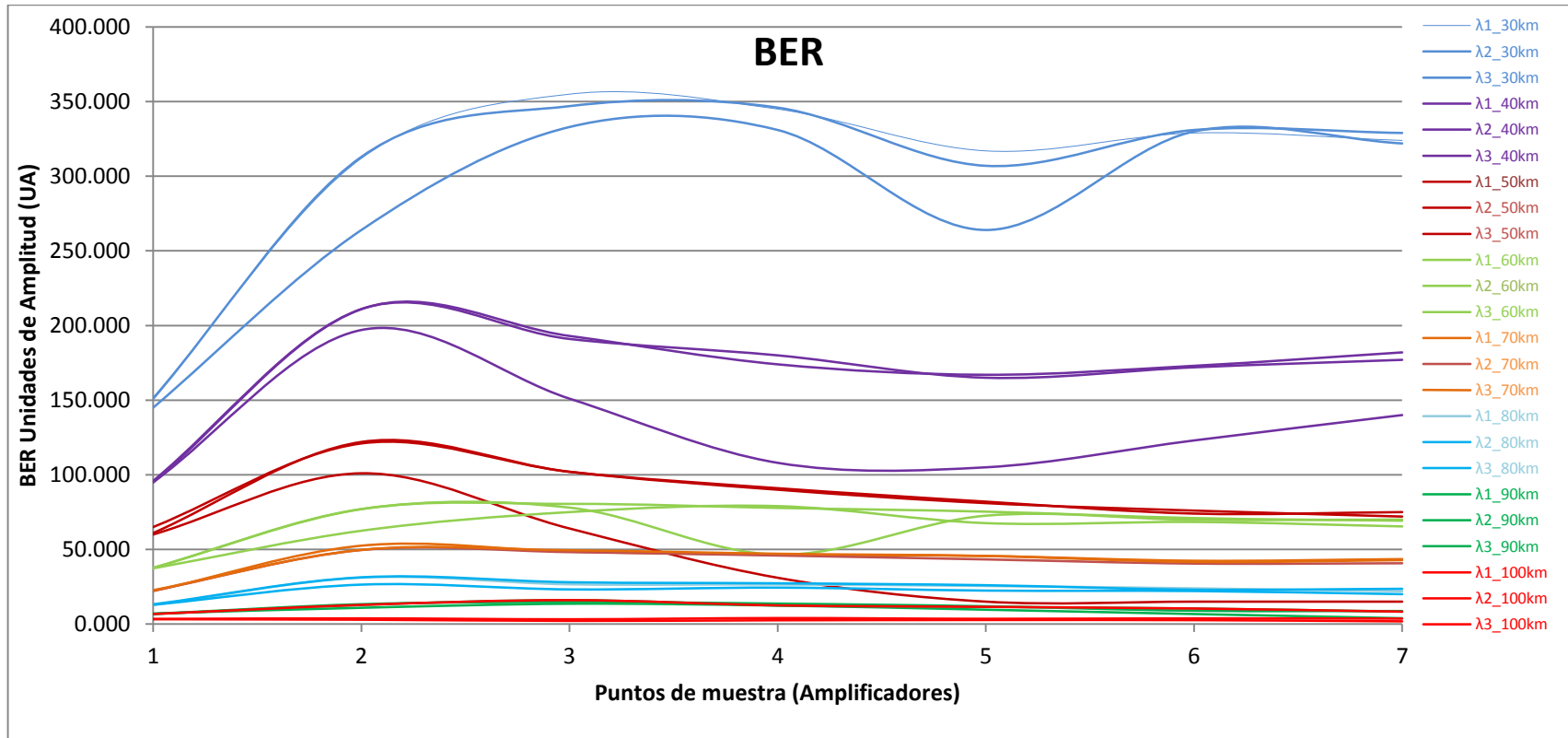


Figura 3.23. Curva de Tendencia Parámetro BER
Fuente: Elaboración propia

4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Resultados

Luego de haber realizado el estudio de la influencia sobre los parámetros BER y OSNR de acuerdo a las diferentes longitudes de enlace y variando el número de amplificadores en un sistema óptico DWM simulado, en este apartado se presentan los resultados obtenidos.

OSNR

Para el análisis del parámetro OSNR, se tomaron datos a partir de un sistema óptico sin amplificadores hasta completar los 6 amplificadores intermedios variando su distancia de separación desde 30 km hasta 100 km. Para un sistema sin amplificadores con distancia de 30 km, los valores de OSNR oscilan en el rango de 42 dB. Para un sistema con 1 amplificador a distancia de 30 Km el parámetro OSNR aumenta hasta 50 dB. Al aumentar el número de amplificadores, el OSNR tiende a mantener un valor constante, degradándose con mayor notoriedad al aumentar la distancia de separación entre amplificadores. Es así que a partir de 100 km de separación los valores obtenidos fueron de entre 11.82 dB y 12.86 dB.

BER

En el caso de BER se tomaron igualmente datos a partir de un sistema óptico sin amplificadores hasta completar los 6 amplificadores intermedios variando su distancia de separación desde 30 km hasta 100 km. Para un sistema con una longitud de 30 km sin amplificadores se obtuvieron valores que llegan hasta las 152 Unidades de Amplitud (BER de aproximadamente $10^{-15.2}$). Estos valores aumentan hasta 360 Unidades de Amplitud (BER de aproximadamente 10^{-36}) al agregar el primer amplificador, con una tendencia a decrementar con el aumento de amplificadores, que se acentúa al incrementar la distancia entre amplificadores. Es así que para un sistema con 6 amplificadores con una distancia de separación de 100 km los valores obtenidos en Unidades de

Amplitud se degradan hasta 3.6 Unidades de Amplitud (BER de aproximadamente $10^{-0.36}$).

4.2. Discusión de Resultados

De los resultados obtenidos se puede resaltar que se tienen ciertas diferencias entre el comportamiento del parámetro OSNR y BER dependiendo de la variación de la distancia de separación y el número de amplificadores EDFAs.

En la figura 5.1 Se observa la degradación del diagrama del ojo obtenida al aumentar la distancia de separación entre amplificadores EDFAs. Se aprecia claramente que tanto el OSNR como el BER se ven degradados por el aumento de la distancia.

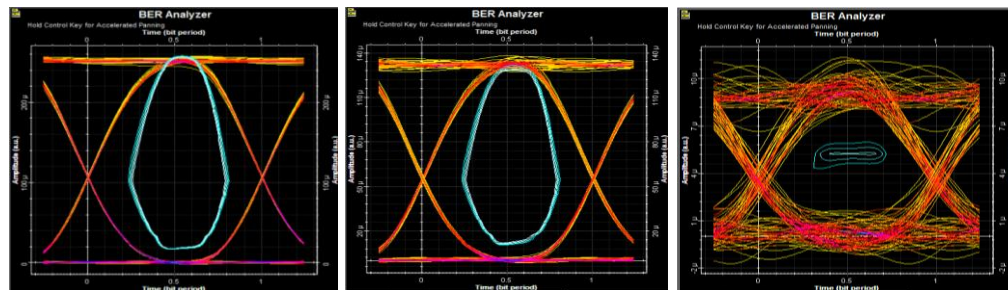


Figura 5.1. Diagrama de ojo a 30 km, 60 Km y 100 Km distancia entre EDFAs.

Fuente: Reporte Simulación Software Optisystem

En la figura 5.2 Se muestra la degradación del diagrama del ojo obtenida al aumentar el número de amplificadores EDFAs. Se observa que el OSNR no posee una variación considerable, con respecto del parámetro BER se aprecia una ligera variación por el aumento del número de amplificadores

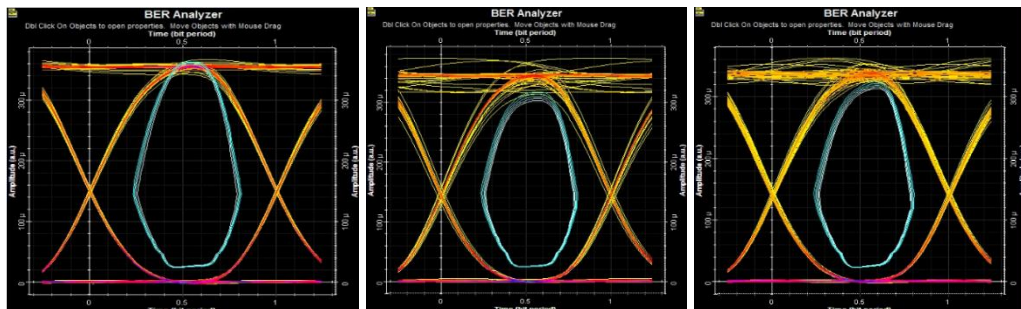


Figura 5.2. Diagrama de ojo a 40 km de separación, con 01 EDFA, 03 EDFAs y 06 EDFAs.

Fuente: Reporte Simulación Software Optisystem

Respecto del OSNR, tomando en cuenta el aumento de la distancia entre EDFAs, se observa una variación de valores que van desde los 50 dB a distancias de separación de 30 Km, hasta valores que alcanzan los 10 dB a distancias de separación de 100 Km. Teniendo en cuenta que un valor adecuado para el OSNR debe estar por encima del umbral de 15 dB, según Sébastien, J. (2016), nuestro sistema se acerca al umbral a una distancia aproximada de 90 km de distancia de separación entre amplificadores, tomándose ésta, como valor crítico para la evaluación el parámetro OSNR en un sistema óptico WDM simulado.

Respecto del OSNR, tomando en cuenta el aumento del número de amplificadores, se presentan variaciones que van desde 1 dB (para el caso del 4to EDFA a distancias de separación de 30 Km) hasta variaciones máximas de 8 dB (para el caso del 2do EDFA a distancias de separación de 70 Km). Sin embargo la tendencia general de las curvas obtenidas al aumentar el número de amplificadores es de mantener valores constantes.

López, A. (2014), en su investigación respecto de un sistema no denso WDM, presenta una tendencia decreciente con relación a la distancia, sin embargo no llega a sobrepasar el umbral OSNR 12 dB planteado por Sébastien, J., (2016), mostrándose una diferencia en la tendencia obtenida en la presente investigación.

Cabe resaltar que la degradación de OSNR generada por el aumento de la distancia entre amplificadores genera degradaciones de hasta 40 dB, en tanto que el aumento del número de amplificadores generó degradaciones de hasta 8 dB.

Respecto del BER, tomando en cuenta el aumento de la distancia entre EDFAs, se observa una variación de valores que van desde las 360 UAs (aproximadamente BER 10^{-36}) a distancias de separación de 30 Km, hasta valores que alcanzan los 3.6 UAs (aproximadamente BER $10^{-0.36}$) a distancias de separación de 100 Km. Tomando en cuenta la información propuesta por Ab-Rahmam, M. Shuhaimi (2012), quienes indican que el umbral para este parámetro en sistemas de telecomunicación terrestres es de 10^{-12} y comparando los valores de los reportes con los de las aproximaciones de probabilidad de error, resulta ser que en esta investigación el parámetro BER sobrepasa el umbral aproximadamente al llegar a los 40 km de distancia de fibra óptica entre amplificadores, lo cual se asumiría como valor crítico para la evaluación el parámetro BER en el sistema óptico WDM simulado.

Con respecto al análisis de los resultados del parámetro BER, se observó que sus valores tienen el mismo comportamiento que el parámetro OSNR, mientras mayor sea la distancia de separación entre amplificadores (para esta tesis de 30km hasta los 100km), es mucho más notoria la degradación del BER. Haciéndose las comparaciones entre unidades de amplitud (A.U.) y los valores obtenidos de probabilidades de BER, para una distancia de 30 Km, se tiene un aproximado de probabilidad de BER de 10^{-35} , y para los 40 km, la probabilidad comienza a degradarse entre valores de $10^{-10.5}$ y $10^{-10.8}$, llegando a valores de degradación de aproximadamente $10^{-0.18}$ a una distancia de 100 Km, es decir con una pérdida aproximada del 66% del total de la información transmitida.

Respecto del BER, tomando en cuenta el aumento del número de amplificadores, se presentan casos de variaciones considerables de alrededor de 120 UAs, que se mencionan a continuación:

- Degradaciones de BER 10^{-36} a BER 10^{-26} entre el 3er y 4to amplificador para el caso de distancia de separación entre EDFAs de 30 Km
- Degradaciones de BER 10^{-22} a BER 10^{-10} entre el 1er y 3er amplificador para el caso de distancia de separación entre EDFAs de 40 Km

- Degradaciones de BER 10^{-15} a BER $10^{-0.2}$ entre el 1er y 3er amplificador para el caso de distancia de separación entre EDFAs de 50 Km

Asimismo, se presentan casos de pequeñas variaciones de alrededor de 10 UAs (Degradaciones de BER 10^{-3} a BER 10^{-2}) para el caso de los enlaces con mayor distancia de separación entre EDFAs.

Con respecto al análisis de los resultados del parámetro BER, su valor tiende a degradarse ligeramente mientras se agrega mayor número de amplificadores, encontrándose un límite al nivel de umbral de 10^{-12} , entre el 3er y 4to amplificador a la distancia de separación de 40 Km entre EDFAs.

Otro punto a resaltar es que la degradación del BER por efecto del aumento de la distancia ocasiona caídas de hasta 350 unidades de amplitud (Ej. caídas de BER de 10^{-35} a $10^{-0.18}$), en tanto el aumento de amplificadores ocasiona caídas máximas de 120 unidades de amplitud (Ej. caída de BER de 10^{-22} a 10^{-10}), las cuales se suelen presentar entre el tercer y cuarto amplificador. Con ello se puede observar que la condición degradación de BER por distancia supera a la degradación por aumento de amplificadores.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Al realizar el proceso de simulación mediante el software OptiSystem 7.0 se pudo estimar que los valores de OSNR varían de 49.5db a 49.7dB cuando la separación entre seis amplificadores es de 30km y varían de 11.8dB a 12.8dB cuando la separación entre seis amplificadores es de 100km, también se pudo estimar que los valores de BER varían entre (10^{-32} a 10^{-33}) cuando la separación entre seis amplificadores es de 30km y varían de 0,18 a 0.83 cuando la separación entre seis amplificadores es de 100km.
- En la comparación de los parámetros de OSNR versus número de amplificadores dopados de erbio y distancia entre estos, se logra estimar que a partir de 90km de distancia se comienza a degradar por debajo de los valores típicos de calidad de un sistema WDM, no teniendo degradación crítica con el aumento de amplificadores.
- En la comparación de los parámetros BER versus número de amplificadores dopados de erbio y distancia se logra observar que la distancia influye en mayor medida que el número de amplificadores sobre la degradación de la tasa de error de bit. La distancia puede degradar hasta 350 unidades de amplitud, en tanto que el aumento de amplificadores llega a degradar un máximo de 120 unidades de amplitud un sistema WDM.

5.2 Recomendaciones

- En la presente investigación se utilizó una versión demostrativa de la herramienta de simulación Optisystem en la cual se demostró que tanto para el OSNR como para el BER tenemos una degradación en un número determinado de longitudes de onda con el aumento de la distancia y el número de amplificadores. En la investigación se utilizaron tres longitudes de onda. Para poder encontrar una mejor caracterización se recomendaría usar mayor cantidad de lambdas, los cuales por temas de capacidad de procesamiento de los equipos no se pudo llevar a cabo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ITU-T Manual (2009). *Optical, fibers, cables and systems*. Switzerland: ITU
- Agraval, G. P. (1992). *Fiber Optic Communications Systems*, WINLEY, J. & SONS.
- Agraval, G. P. (1995). *Nonlinear Fiber Optics*. Academics Press.
- Tomasi, W. (2003), *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Arizona. Prentice Hall.
- Laude, J., (2002). *DWDM Fundamentals, Components, and Applications*. Boston
- Millán, R. (1998). *Estudio y diseño de multiplexores por división en longitud de onda (WDM) mediante efectos electroópticos, termoópticos y acustoópticos*. Universidad de Valladolid.
- Gama, J. (2012). *Análisis del Desempeño de Sistemas WDM utilizando formatos avanzados de modulación óptica a tasas superiores a 10 Gb/s*. Universidad Autónoma de México.
- López, A (2014). *Diseño, análisis y simulación de enlaces ópticos que utilizan Multiplexación por División en Longitudes de Ondas a través de la práctica de laboratorio*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas en Cuba
- Ayala, B., (2011). *Implementación del Método de Cambio de Fase para la Medición de Dispersión Cromática en Fibras para Telecomunicaciones*. Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., División de Fotónica, Santiago de Querétaro.
- Gualda, E., (2000). *Optimización de las prestaciones de enlaces ópticos submarinos de gran capacidad y larga distancia mediante el control de la dispersión*. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Fundamental of Photonics (2000). *Fiber Optic Telecommunications*, Recuperado de: <https://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2008.pdf>

- OpenStax- CNX (2011). *Interferencia Intersimbólica (ISI)*.
- López, J. G., (2011). *Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM*. Dialnet. Vol. 20, Número 31.
- Buelvas, D. A. (2009). *Redes Ópticas DWDM: Diseño E Implementación*
- Del Río, C., Rodriguez, P., (2013). *Fibras ópticas: Interacción dispersión-chirp en sistemas ópticos modulados directamente*. Óptica Pura y Aplicada. Vol. 46.
- Sébastien, J. (2016). *Fiber optic communication system design guides – Part 12: In-band optical signal-to-noise ratio (OSNR)*. Edition 1, page. 33.
- Keith Willox. (2003). *Q Factor: The Wrong Answer for Service Providers and NEMs*.
- Behera, D., Varshney, S., Srivastava, S., Tiwari S. (2011, 16 de diciembre). *Eye Diagram Basics: Reading and applying eye diagrams*. EDN NETWORK. Recuperado :<http://www.edn.com/design/test-and-measurement/4389368/Eye-Diagram-Basics-Reading-and-applying-eye-diagrams>
- Wolfe, J. (2017). dB: *What is a decibel?* PHYSCLIPS. <http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/dB.htm>
- Chakma, T. (2005). Optical Signal to Noise Ratio (OSNR) [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de: <http://cdn.optiwave.com/wp-content/uploads2015/10/TC-Optical-Signal-to-Noise-Ratio-OSNR.ppt>

ANEXOS:

Anexo 1:

Tabla con el reporte del resultado final de los parámetros analizados OSNR y algunas simulaciones teniendo en cuenta el número de amplificadores y la distancia entre estos.

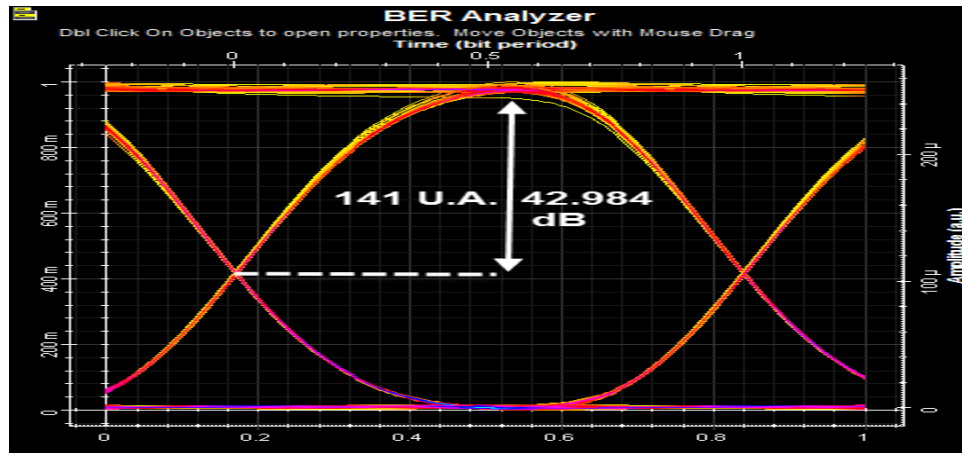
OSNR en UA

Distancia	30km			40km			50km			60km			70km			80km			90km			100km		
Puntos	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050
P1	141.000	136.000	141.000	88.000	87.000	88.000	56.000	56.000	56.000	39.500	35.200	35.300	21.380	21.600	20.900	20.900	13.100	13.320	8.200	7.860	7.600	3.700	4.200	4.200
P2	299.000	284.000	299.000	195.000	192.000	197.000	118.000	108.000	119.000	76.000	71.000	75.000	48.000	47.300	49.700	49.700	28.400	30.500	13.400	12.200	12.700	4.700	4.400	4.000
P3	315.000	299.000	310.000	178.000	166.000	182.000	105.000	95.000	109.000	74.000	72.000	76.400	26.000	45.700	46.600	46.600	25.700	27.400	15.300	14.800	15.400	4.500	4.100	3.500
P4	311.000	306.000	306.000	170.000	147.000	180.000	95.000	86.000	103.000	72.400	73.200	73.600	43.200	43.300	44.700	44.700	25.000	26.600	14.100	14.100	12.700	3.300	4.100	4.700
P5	300.000	282.000	294.000	168.000	153.000	170.000	86.000	78.000	93.000	71.400	68.100	71.800	43.200	41.300	43.800	43.800	23.500	25.000	12.700	12.900	12.600	4.500	3.850	4.300
P6	303.000	303.000	307.000	175.000	161.000	177.000	93.000	76.000	93.000	72.100	66.000	72.000	43.600	41.000	42.600	42.600	21.300	23.300	10.000	10.100	11.100	4.450	4.450	4.550
P7	300.000	303.000	306.000	182.000	171.000	177.000	94.000	76.000	95.000	67.600	63.000	68.300	41.300	40.200	41.500	41.500	21.300	22.600	10.300	8.600	10.000	4.200	3.900	4.400

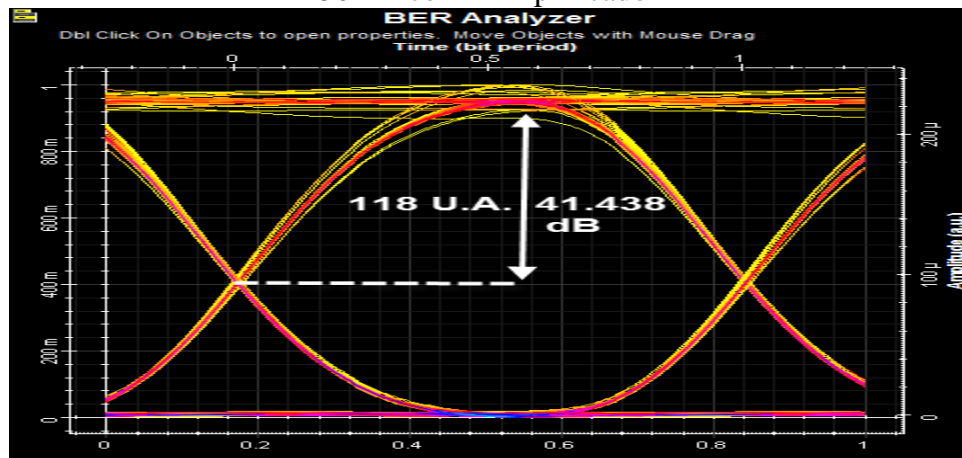
OSNR en dB

Distancia	30km			40km			50km			60km			70km			80km			90km			100km		
Puntos	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050
P1	42.984	42.671	42.984	38.890	38.790	38.890	34.964	34.964	34.964	31.932	30.931	30.955	26.600	26.689	26.403	26.403	22.345	22.490	18.276	17.908	17.616	11.364	12.465	12.465
P2	49.513	49.066	49.513	45.801	45.666	45.889	41.438	40.668	41.511	37.616	37.025	37.501	33.625	33.497	33.927	33.927	29.066	29.686	22.542	21.727	22.076	13.442	12.869	12.041
P3	49.966	49.513	49.827	45.008	44.402	45.201	40.424	39.554	40.749	37.385	37.147	37.662	28.299	33.198	33.368	33.368	28.199	28.755	23.694	23.405	23.750	13.064	12.256	10.881
P4	49.855	49.714	49.714	44.609	43.346	45.105	39.554	38.690	40.257	37.195	37.290	37.338	32.710	32.730	33.006	33.006	27.959	28.498	22.984	22.984	22.076	10.370	12.256	13.442
P5	49.542	49.005	49.367	44.506	43.694	44.609	38.690	37.842	39.370	37.074	36.663	37.122	32.710	32.319	32.829	32.829	27.421	27.959	22.076	22.212	22.007	13.064	11.709	12.669
P6	49.629	49.629	49.743	44.861	44.137	44.959	39.370	37.616	39.370	37.159	36.391	37.147	32.790	32.256	32.588	32.588	26.568	27.347	20.000	20.086	20.906	12.967	12.967	13.160
P7	49.542	49.629	49.714	45.201	44.660	44.959	39.463	37.616	39.554	36.599	35.987	36.688	32.319	32.085	32.361	32.361	26.568	27.082	20.257	18.690	20.000	12.465	11.821	12.869

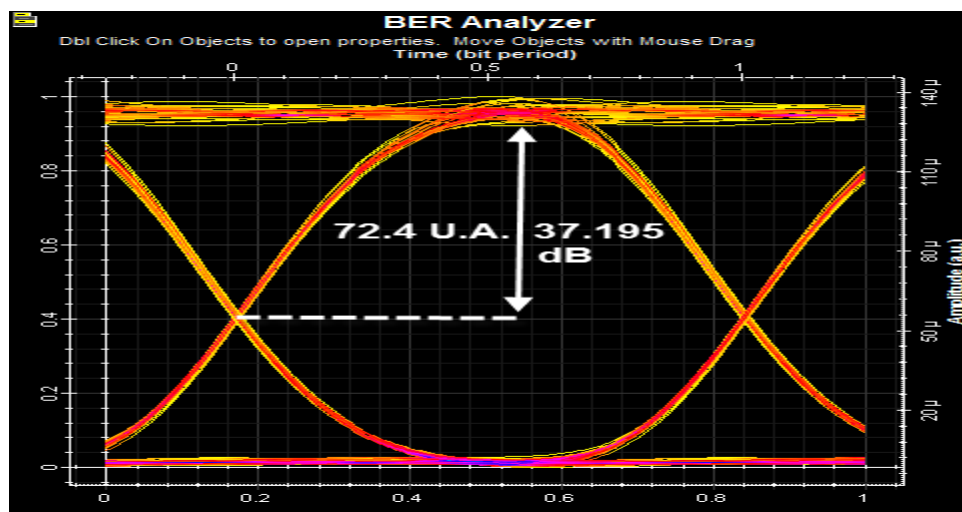
30 km sin Amplificadores



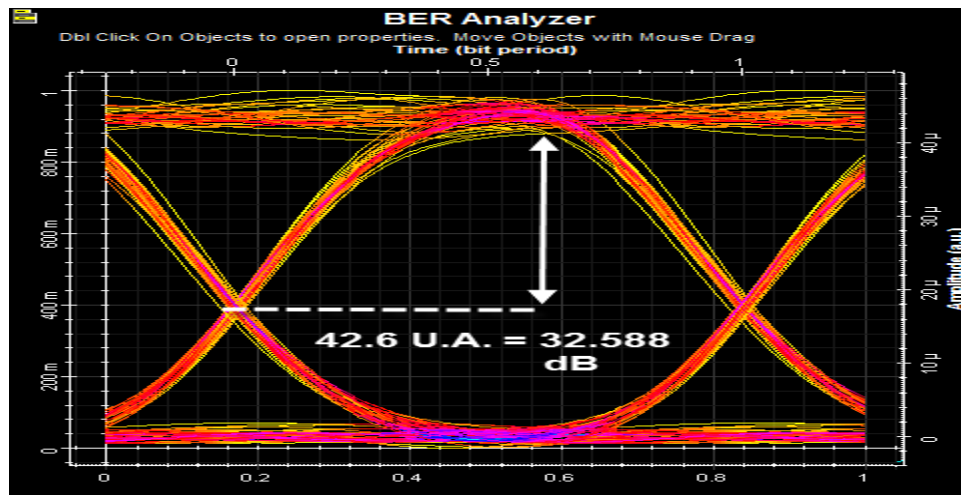
50 km con 1 Amplificador



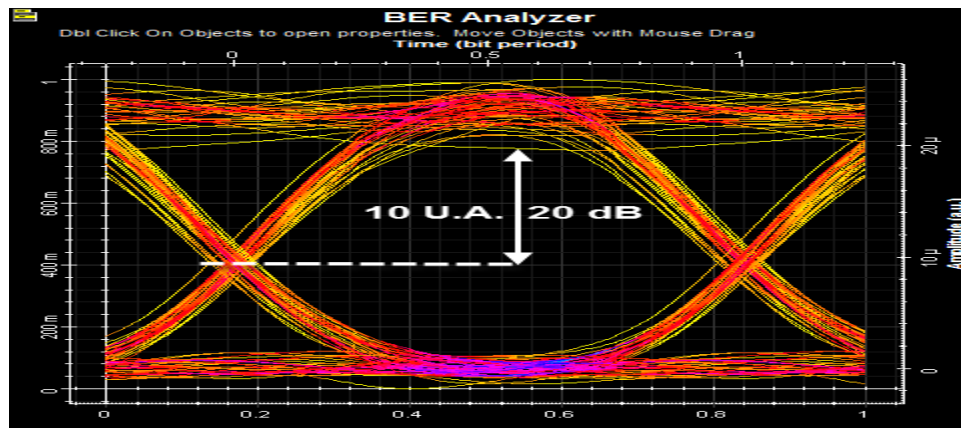
60 km con 3 Amplificadores



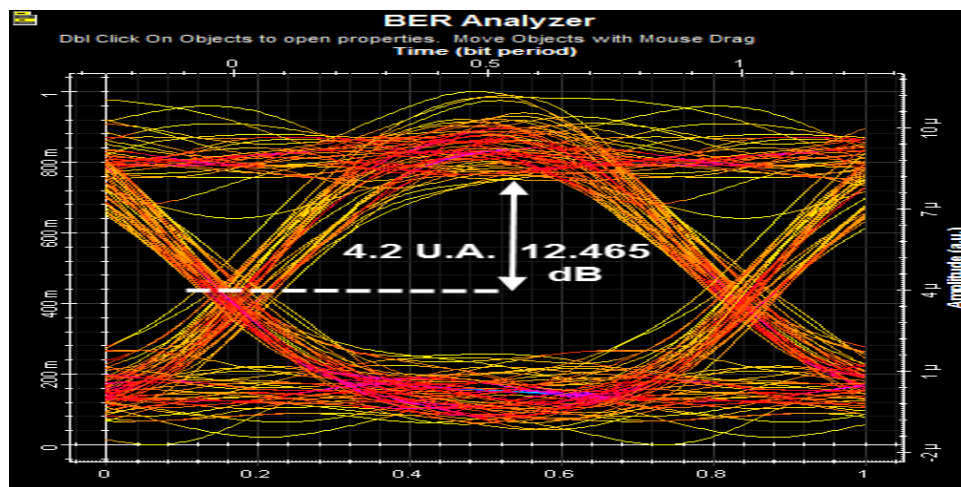
80 km con 5 amplificadores



90km con 5 amplificadores



100 km con 6 amplificadores



Anexo 2:

Tabla con el reporte del resultado final de los parámetros analizados BER y algunas simulaciones teniendo en cuenta el número de Amplificadores y la distancia entre estos.

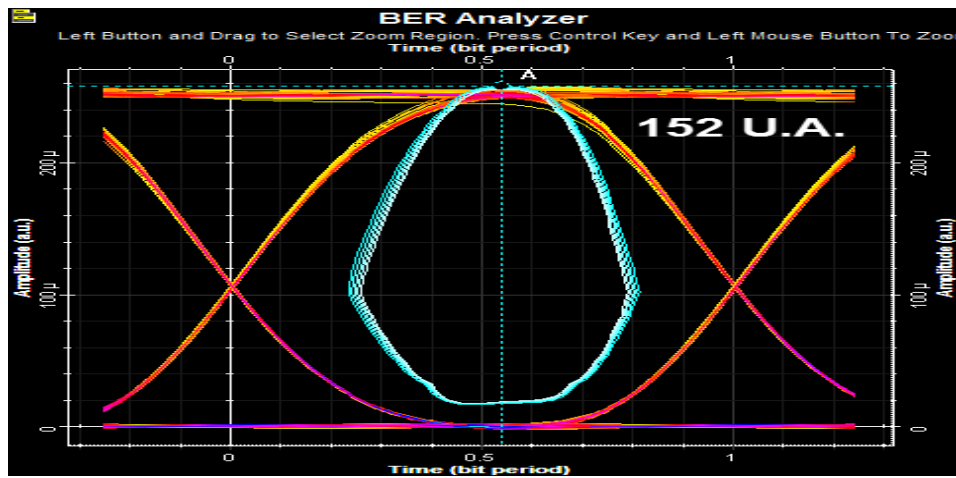
BER en UA

Distancia	30km			40km			50km			60km			70km			80km			90km			100km		
Puntos	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050
P1	152.000	145.000	151.000	95.000	95.000	96.000	65.000	60.000	61.000	37.700	37.300	37.700	22.080	22.400	22.700	12.700	12.900	13.220	6.800	7.060	6.700	6.700	3.200	3.400
P2	312.000	264.000	313.000	211.000	197.000	211.000	121.000	101.000	122.000	77.000	62.500	77.000	52.500	49.600	49.700	31.100	26.400	31.300	13.300	10.900	12.800	12.800	2.900	3.800
P3	355.000	333.000	347.000	193.000	151.000	191.000	102.000	64.000	102.000	78.000	75.000	80.500	48.500	48.200	49.400	26.600	23.200	28.000	14.800	13.600	16.000	16.000	2.100	3.200
P4	345.000	331.000	346.000	174.000	108.000	180.000	91.000	31.000	90.000	46.500	79.000	77.800	46.400	45.900	47.100	26.500	24.400	27.300	13.700	12.400	12.500	12.500	2.500	4.000
P5	317.000	264.000	307.000	167.000	105.000	165.000	82.000	15.000	81.000	72.600	67.600	75.300	45.600	43.300	45.600	25.500	22.400	26.000	11.900	9.600	11.500	11.500	2.700	3.500
P6	329.000	330.000	331.000	173.000	123.000	172.000	74.000	15.000	76.000	69.800	68.400	71.000	42.400	40.500	41.600	23.900	22.100	23.000	8.900	6.700	10.400	10.400	2.600	3.800
P7	324.000	322.000	329.000	182.000	140.000	177.000	75.000	15.000	72.000	70.000	65.400	69.200	43.500	40.700	42.800	22.000	20.000	23.600	8.700	3.900	8.300	8.300	1.800	3.600

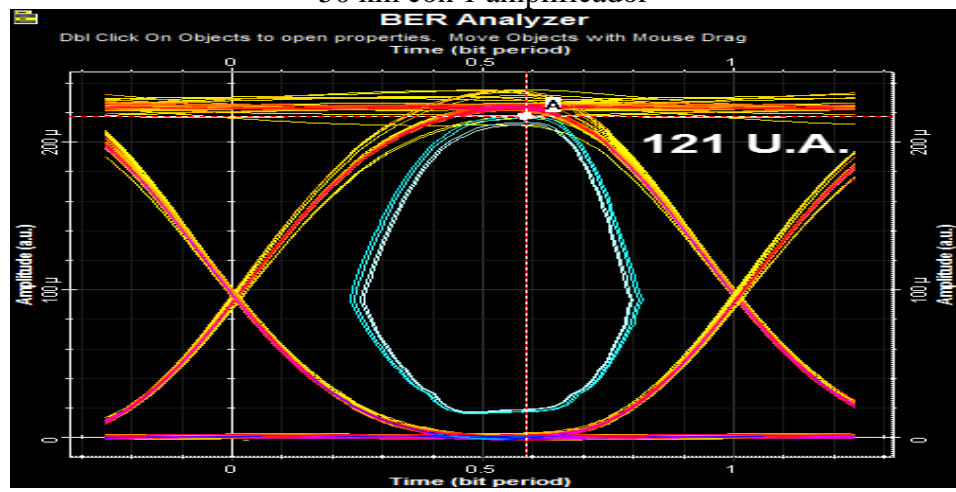
BER

Distancia	30km			40km			50km			60km			70km			80km			90km			100km		
Puntos	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050	193.000	193.025	193.050
P1	-15.200	-14.500	-15.100	-9.500	-9.500	-9.600	-6.500	-6.000	-6.100	-3.770	-3.730	-3.770	-2.208	-2.240	-2.270	-1.270	-1.290	-1.322	-0.680	-0.706	-0.670	-0.670	-0.320	-0.340
P2	-31.200	-26.400	-31.300	-21.100	-19.700	-21.100	-12.100	-10.100	-12.200	-7.700	-6.250	-7.700	-5.250	-4.960	-4.970	-3.110	-2.640	-3.130	-1.330	-1.090	-1.280	-1.280	-0.290	-0.380
P3	-35.500	-33.300	-34.700	-19.300	-15.100	-19.100	-10.200	-6.400	-10.200	-7.800	-7.500	-8.050	-4.850	-4.820	-4.940	-2.660	-2.320	-2.800	-1.480	-1.360	-1.600	-1.600	-0.210	-0.320
P4	-34.500	-33.100	-34.600	-17.400	-10.800	-18.000	-9.100	-3.100	-9.000	-4.650	-7.900	-7.780	-4.640	-4.590	-4.710	-2.650	-2.440	-2.730	-1.370	-1.240	-1.250	-1.250	-0.250	-0.400
P5	-31.700	-26.400	-30.700	-16.700	-10.500	-16.500	-8.200	-1.500	-8.100	-7.260	-6.760	-7.530	-4.560	-4.330	-4.560	-2.550	-2.240	-2.600	-1.190	-0.960	-1.150	-1.150	-0.270	-0.350
P6	-32.900	-33.000	-33.100	-17.300	-12.300	-17.200	-7.400	-1.500	-7.600	-6.980	-6.840	-7.100	-4.240	-4.050	-4.160	-2.390	-2.210	-2.300	-0.890	-0.670	-1.040	-1.040	-0.260	-0.380
P7	-32.400	-32.200	-32.900	-18.200	-14.000	-17.700	-7.500	-1.500	-7.200	-7.000	-6.540	-6.920	-4.350	-4.070	-4.280	-2.200	-2.000	-2.360	-0.870	-0.390	-0.830	-0.830	-0.180	-0.360

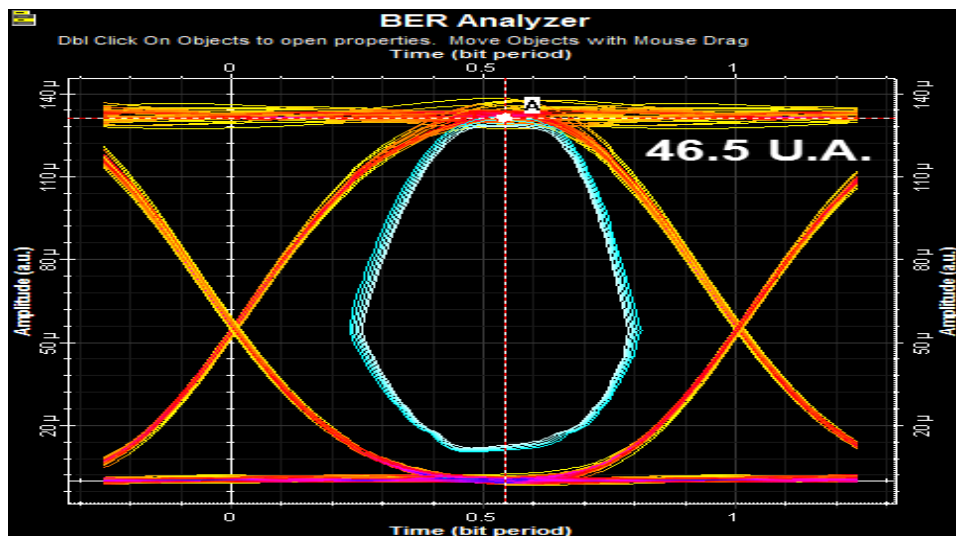
30 km sin amplificadores



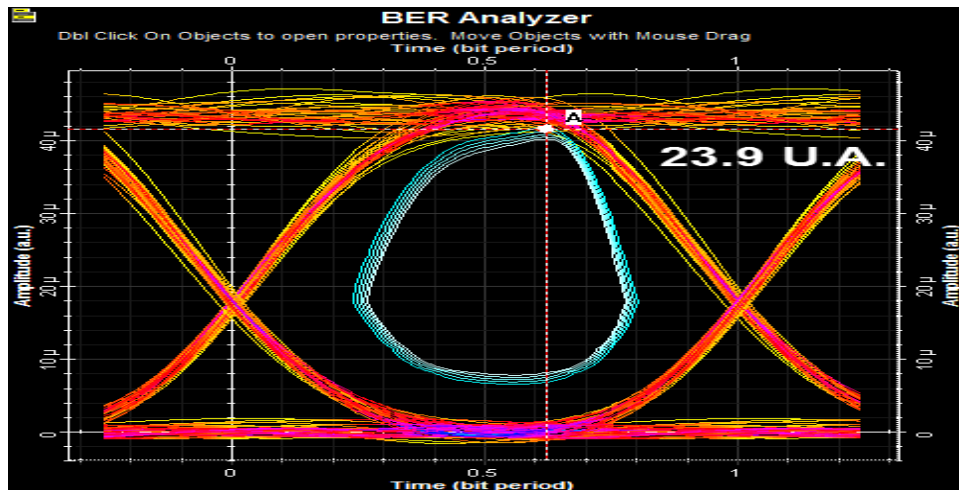
50 km con 1 amplificador



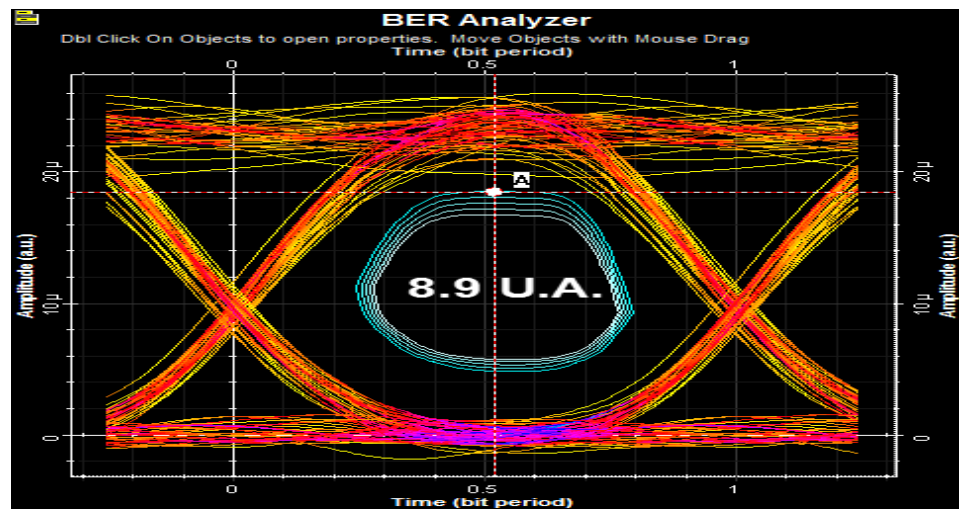
60 km con 3 amplificadores



80 km con 5 amplificadores



90 km con 5 amplificadores



100 km con 6 amplificadores

